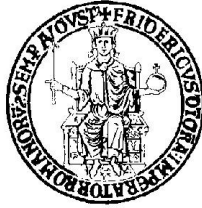


# **Università degli studi di Napoli Federico II**



Scuola Politecnica e delle Scienze di Base

Dottorato di ricerca in Ingegneria dei Materiali e delle Strutture  
XXVIII ciclo

Candidato:  
**Nicola Di Fiore**

**Un contributo alla valutazione del rischio incendio di hangar  
metallici con i metodi della Fire Safety Engineering nell'ambito  
del quadro normativo attuale**

**Coordinatore di dottorato:**  
Prof. Ing. Giuseppe Mensitieri

**Relatore:**  
Prof. Ing. Emidio Nigro  
**Controrelatore:**  
Col. Ing. Renato Beatrice

Anno accademico 2016/2017

# Indice

1	Introduzione.....	i
1.1	L'INGEGNERIA DELLA SICUREZZA ANTINCENDIO .....	I
1.2	OBIETTIVI DELLA TESI.....	IV
1.3	STRUTTURA DEL DOCUMENTO .....	V
2	Il rischio incendio nel quadro normativo attuale.....	2-7
2.1	APPROCCIO PRESCRITTIVO E APPROCCIO PRESTAZIONALE .....	2-8
2.2	QUADRO NORMATIVO: DAL 1961 FINO AI NUOVI METODI.....	2-9
2.2.1	Circolare 91/1961: un riferimento normativo durato 46 anni. ....	2-11
2.2.2	Decreto Ministeriale del 30 Novembre 1983: la definizione del “REI” .....	2-12
2.2.3	La direttiva sui prodotti da costruzione .....	2-13
2.2.4	Eurocodici.....	2-14
2.2.5	Requisiti di prestazione ai sensi delle norme tecniche per le costruzioni (DM 14-01-2008).....	2-15
2.2.6	Nuove Norme Tecniche di Prevenzione Incendi D.M.Int. 03/08/2015 .....	2-18
2.3	NFPA 409 (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION “STANDARD ON AIRCRAFT HANGARS”).....	2-23
2.4	ALCUNE CONSIDERAZIONI SULLE NORMATIVE .....	2-24
3	Structural Fire Safety Engineering .....	3-28
3.1	CARICO DI INCENDIO .....	3-28
3.2	REQUISITI DI PRESTAZIONE DI RESISTENZA AL FUOCO .....	3-31
3.3	CRITERI PER LA DETERMINAZIONE D'INCENDI NATURALI.....	3-33
3.4	MODELLI D'INCENDIO .....	3-35
3.5	CURVE D'INCENDIO NOMINALI.....	3-36
3.6	CURVE D'INCENDIO PARAMETRICHE .....	3-38
3.7	CARATTERISTICHE TERMICHE E MECCANICHE DEI MATERIALI DA COSTRUZIONE SOTTOPOSTI A INCENDIO .....	3-41
3.7.1	Caratteristiche termiche .....	3-41
3.7.2	Proprietà meccaniche dei materiali.....	3-44
4	Analisi termo-meccanica delle strutture in condizioni di incendio..	4-49

4.1	MODELLI TERMO-FLUIDODINAMICI UTILIZZATI .....	4-49
4.1.1	Modellazione a zone: Ozone e CFAST .....	4-51
4.1.2	Modello Fluidodinamico con FDS: Parametri di input ed ipotesi di calcolo .....	4-54
4.2	MODELLAZIONE TERMO-MECCANICA CON IL CODICE DI CALCOLO AGLI ELEMENTI FINITI: SAFIR2016 .....	4-56
5	Hangar Metallico ad uso Magazzino.....	5-59
5.1	DESCRIZIONE GENERALE.....	5-59
5.2	ATTIVITÀ DI RILIEVO DELLE CARATTERISTICHE DEL FABBRICATO .....	5-61
5.2.1	Struttura originale .....	5-61
5.2.2	Storico degli interventi strutturali .....	5-64
5.2.3	Stato di fatto dell'edificio .....	5-67
5.3	RILIEVO DEI CARICHI DI INCENDIO TRAMITE DATI SPERIMENTALI E METODI DI LETTERATURA .....	5-71
5.4	DEFINIZIONE DEGLI SCENARI DI INCENDIO .....	5-75
5.5	CARATTERISTICHE DELLE CURVE NATURALI DI INCENDIO .....	5-77
5.5.1	Curve di rilascio termico dei singoli materiali (dati sperimentali e di letteratura).....	5-78
5.6	SCENARI DI INCENDIO E CURVE DI RILASCIO TERMICO .....	5-85
5.6.1	Calcolo delle curve di incendio negli scenari considerati.....	5-87
5.7	ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI RESISTENZA AL FUOCO.....	5-95
5.7.1	Livelli di prestazione di resistenza al fuoco e profili di rischio .....	5-95
5.7.2	Procedimento di calcolo semplificato delle sezioni attraverso il nomogramma ....	5-98
5.7.3	Analisi termo-meccaniche .....	5-100
5.8	COMMENTI AI RISULTATI OTTENUTI .....	5-117
5.8.1	Considerazioni su parametri di normativa consigliati per edifici industriali .....	5-117
5.8.2	Prestazioni della struttura sottoposta ad incendio .....	5-122
6	Hangar metallico ad uso Aviorimessa.....	6-131
6.1	DESCRIZIONE STRUTTURALE DELL'HANGAR .....	6-131
6.2	RILIEVO DEI CARICHI DI INCENDIO TRAMITE DATI SPERIMENTALI E METODI DI LETTERATURA .....	6-135
6.3	SCENARI DI INCENDIO E CURVE DI RILASCIO TERMICO .....	6-136
6.3.1	Curve di incendio naturali .....	6-139

6.4	ANALISI DELLE PRESTAZIONI DI RESISTENZA AL FUOCO.....	6-144
6.4.1	Livelli di prestazione di resistenza al fuoco e profili di rischio .....	6-144
6.4.2	Analisi termo-meccaniche .....	6-147
6.5	COMMENTI AI RISULTATI OTTENUTI .....	6-159
7	Conclusioni.....	7-168
8	Bibliografia.....	8-178



## Indice delle figure

Figura 2-1 - Procedimenti di progettazione secondo l'impostazione degli Eurocodici.....	2-15
Figura 3-1 - Opzioni per la modellazione dell'incendio [Bailey (2004)].....	3-36
Figura 3-2 Curva d'incendio standard – ISO 834 (6) .....	3-37
Figura 3-3 - Curva nominale degli idrocarburi.....	3-38
Figura 3-4 - Curva nominale per ambienti esterni .....	3-38
Figura 3-5 - Curva d'incendio parametrica.....	3-40
Figura 3-6 - Confronto tra una curva d'incendio parametrica e curva ISO834.....	3-40
Figura 3-7 - Variazione della dilatazione termica ( $\Delta l/l$ ) dell'acciaio in funzione della temperatura.....	3-42
Figura 3-8 - Variazione del calore specifico dell'acciaio in funzione della temperatura .....	3-42
Figura 3-9 Variazione della conducibilità termica dell'acciaio in funzione della temperatura .....	3-42
Figura 3-10 Variazione della dilatazione termica per calcestruzzo normale (NC) e per calcestruzzo alleggerito (LC) in funzione della temperatura.....	3-43
Figura 3-11 Variazione del calore specifico per calcestruzzo normale (NC) e per calcestruzzo alleggerito (LC) in funzione della temperatura .....	3-43
Figura 3-12 Variazione della conducibilità termica per calcestruzzo normale (NC) e per calcestruzzo alleggerito (LC) in funzione della temperatura.....	3-43
Figura 3-13 - Rappresentazione grafica del legame tensione-deformazione per calcestruzzi silicei con ramo linearmente decrescente .....	3-45
Figura 3-14 – Legame costitutivo dell'acciaio strutturale in dipendenza della temperatura .....	3-46
Figura 3-15 Fattori di riduzione della resistenza e della rigidezza per il calcestruzzo normale (NC) e alleggerito (LC).....	3-47
Figura 3-16 - Fattori di riduzione della resistenza e della rigidezza per l'acciaio strutturale.....	3-47
Figura 4-1 – Finestra di inserimento sensori termici (CFAST 7.1.1).....	4-53
Figura 4-2 – Esempio di benchmark Ozone-CFAST.....	4-53
Figura 4-3 – Hangar magazzino modellato in FDS (smokeview).....	4-55
Figura 4-4 – Hangar aviorimessa: esempio di sensori AST posti in corrispondenza delle capriate modellato in FDS (smokeview).....	4-56
Figura 4-5 – Processo operativo del programma di analisi.....	4-58
Figura 5-1 : Vista satellitare .....	5-59
Figura 5-2 - Dimensioni di ingombro del velivolo F84 Thunderjet, movimentato nell'hangar nella precedente destinazione d'uso (15) .....	5-60
Figura 5-3 - Pianta del progetto originale (stralcio).....	5-62
Figura 5-4 - Vista frontale anteriore (stralcio).....	5-63
Figura 5-5 Sezione trasversale (stralcio).....	5-63
Figura 5-6 - Sezione longitudinale (stralcio) .....	5-63
Figura 5-7 Appendice .....	5-65
Figura 5-8 Architettonico dell'appendice .....	5-65

Figura 5-9 - Pannelli di controsoffittatura, rimossi nell'attuale configurazione .....	5-66
Figura 5-10 Pavimentazione dell'hangar magazzino .....	5-66
Figura 5-11 Copertura attuale .....	5-67
Figura 5-12 – Modello strutturale dell'hangar .....	5-67
Figura 5-13 -Elemento inferiore collegante i due appoggi .....	5-68
Figura 5-14 - Foto del nodo di appoggio .....	5-68
Figura 5-15 – Sezione “IPE” formata da piatti saldati.....	5-69
Figura 5-16 – Particolare di un nodo .....	5-69
Figura 5-17- Sezione verticale con doppia C saldata ad una piastra .....	5-69
Figura 5-18 - Nodo superiore .....	5-70
Figura 5-19 – Sezione piena in acciaio d=10cm .....	5-70
Figura 5-20 – Vista dell'intradosso di copertura .....	5-70
Figura 5-21 – Variazione del carico di incendio specifico.....	5-74
Figura 5-22 - Scenario 1 dimensioni compartimento 33m x 36m.....	5-75
Figura 5-23 - Scenario 2 dimensioni compartimento 33m x 36m.....	5-76
Figura 5-24 – RHR di pallets da test al calorimetrico.....	5-78
Figura 5-25 – Tende campali – Curva RHR con metodo $t^2$ .....	5-80
Figura 5-26 - Esempio di configurazioni giornaliere di razioni k .....	5-81
Figura 5-27 – Test su cibi confezionati .....	5-81
Figura 5-28 – RHR di 7670 kg di razioni k accatastate .....	5-82
Figura 5-29 – Farmaci curva $t^2$ .....	5-83
Figura 5-30 - Prove su scala reale di condizionatori (29) .....	5-84
Figura 5-31 - Prove su scala reale di lavatrici (21) .....	5-84
Figura 5-32 - Giacche da uomo prove in scala reale (39) .....	5-84
Figura 5-33 – Test in scala reale su autovetture di classe 3 .....	5-85
Figura 5-34 – Curva RHR dello scenario 1 .....	5-86
Figura 5-35 – Curva RHR totale scenario 2.....	5-87
Figura 5-36 – Alloggiamento dei materiali stoccati.....	5-88
Figura 5-37 sono state rilevate le temperature AST.....	5-88
Figura 5-38 – Confronto temperature della zona superiore con la ISO834 (Scen1 config1) .....	5-89
Figura 5-39 – Confronto temperature della zona superiore con la ISO834 (Scen1 config2) .....	5-89
Figura 5-40 – Scenario 1-portali aperti - Temperature “upper layer” rilevata da Ozone-CFAST e FDS in punti differenti in pianta .....	5-90
Figura 5-41 - Scenario 1-portali aperti - Temperature “upper layer” rilevata da Ozone-CFAST e FDS in punti differenti in pianta .....	5-91
Figura 5-42 – Scenario 1 AST nelle 5 zone calcolate con modello CFD.....	5-91
Figura 5-43 - Scenario 1 portoni chiusi – Rilievo temperature medie di AST a $t=1690s$ (Smokeview) ..	5-92
Figura 5-44 – Temperature modelli a zone – configurazione con portoni di ingresso chiusi .....	5-93
Figura 5-45 - Temperature modelli a zone – configurazione con portoni di ingresso aperti.....	5-93
Figura 5-46 – Scenario 2 - AST nelle 5 zone calcolate con modello CFD .....	5-94
Figura 5-47 - Scenario 2 portoni aperti – Rilievo temperature medie di AST a $t=1350s$ (Smokeview) ..	5-94
Figura 5-48 – Livelli di prestazione per la resistenza al fuoco Tabella S.2.1 del DM 03/08/2015 (2).....	5-95

Figura 5-49- Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione tabella S.2.2 del DM 03/08/2015 (2) .....	5-96
Figura 5-50- Classe minima di resistenza al fuoco Tabella S.2.3 del DM 03/08/2015 (2) .....	5-97
Figura 5-51 – Tipologia sezioni della capriata principale.....	5-98
Figura 5-52 – Fattore di utilizzazione e fattore di sezione .....	5-99
Figura 5-53 – Nomogramma per il corrente inferiore.....	5-99
Figura 5-54 – Nomogramma per gli elementi diagonali .....	5-100
Figura 5-55 – Modello strutturale SAFIR2016 (14) .....	5-101
Figura 5-56 – Analisi termica corrente inferiore ISO834 $t=2400s$ (Diamond) .....	5-102
Figura 5-57 – Analisi termica sezione circolare piena in acciaio ISO834 $t=1200s$ (Diamond) .....	5-102
Figura 5-58 – Temperatura media corrente inferiore con curva ISO834 .....	5-103
Figura 5-59 Sollecitazioni-Resistenze-Temperatura nel tempo per elemento diagonale (+ compress – tensione) .....	5-104
Figura 5-60 – Inizio sbandamento a 70s circa (Diamond) .....	5-104
Figura 5-61 Sollecitazioni-Resistenze-Temperatura nel tempo per elementi diagonali (+ compress – tensione) .....	5-105
Figura 5-62 Zone dove sono stati posti dei sensori.....	5-106
Figura 5-63 – Temperature del corrente inferiore nelle zone di incendio .....	5-107
Figura 5-64 – Modello strutturale SAFIR con curve di incendio FDS .....	5-107
Figura 5-65 – Verifica corrente superiore SX (sez06).....	5-108
Figura 5-66 – Verifica corrente superiore DX (sez06) .....	5-108
Figura 5-67 – Sezione 4 angolari 50x5 con vernici intumescenti $t=25$ min (Diamond) .....	5-109
Figura 5-68 – Temperature sezione02 con vernici intumescenti .....	5-110
Figura 5-69 – Instabilizzazione per sforzi di compressione dei diagonali .....	5-111
Figura 5-70 – Crisi strutturale per instabilità a sforzo normale $t=42$ min (2500s) .....	5-111
Figura 5-71 – Struttura protetta con vernici intumescenti di $\mu 1200$ mm, curva incendio ISO834, $t=42$ min (2500 s) – (scala spostamenti x 1) .....	5-111
Figura 5-72 Confronto della temperatura di una sezione protetta con vernice intumescente 1200 $\mu m$ (ISO e curve naturali d'incendio).....	5-112
Figura 5-73 Confronto della temperatura della sezione con curve naturali di incendio (non protetta e protetta con vernice intumescente 1200 $\mu m$ ).....	5-113
Figura 5-74 –Sforzo normale sui diagonali (positivi compressione, negativi trazione) .....	5-114
Figura 5-75 –Selezione, tramite back-analysis, delle sezioni da proteggere.....	5-114
Figura 5-76 – Sollecitazione-Resistenza per sforzo normale assiale di compressione.....	5-115
Figura 5-77 – Sollecitazione-Resistenza per sforzo normale assiale di compressione.....	5-115
Figura 5-78 – Struttura parzialmente protetta con vernici intumescenti di $\mu 1200$ mm, curva incendio ISO834, $t=20$ min (1210 s) – (scala spostamenti x 1).....	5-116
Figura 5-79 – Sollecitazione-resistenza nel corrente superiore.....	5-117
Figura 5-80 – Tabella M.2.2 del DM 03/08/2015 .....	5-118
Figura 5-81 – scenario 1 confronto RHR tra normativa e approccio ingegneristico .....	5-119
Figura 5-82 – scenario 2 confronto RHR tra normativa e approccio ingegneristico .....	5-120
Figura 5-83 – scenario 1 confronto temperature .....	5-121
Figura 5-84 – scenario 2 confronto temperature .....	5-121

Figura 5-85 – Scenario 2, incendio naturale, abbassamento in mezzeria.....	5-128
Figura 5-86 – Zone caratterizzate da temperature differenti (calcolate con FDS) .....	5-129
Figura 5-87 – Confronto temperature sezione zonale vs zona5 (protetta e non protetta).....	5-129
Figura 5-88 – Scenario 2, incendio naturale, spostamento laterale .....	5-130
Figura 6-1 – Hangar aviorimessa: principali dimensioni di ingombro in pianta.....	6-132
Figura 6-2 – Hangar aviorimessa: sezione in corrispondenza dei pilastri .....	6-132
Figura 6-3 – Hangar aviorimessa: prospetto EST .....	6-133
Figura 6-4 – Hangar aviorimessa: prospetto EST .....	6-133
Figura 6-5- Velivolo utilizzato in passato - Breguet Br 1150 Atlantic .....	6-133
Figura 6-6- Velivolo attualmente in dotazione presso l'hangar: ATR-72MP .....	6-134
Figura 6-7- Velivolo ATR-72MP con funzioni di pattugliamento marittimo .....	6-134
Figura 6-8 – Vista di modello in 3d dall'alto dell'hangar aviorimessa .....	6-137
Figura 6-9 – Curve RHR del JP4 per differenti valori di superficie a contatto con l'aria .....	6-139
Figura 6-10 – Hangar aviorimessa: distribuzione delle temperature con AST (FDS + smokeview) .....	6-140
Figura 6-11 – Hangar aviorimessa: distribuzione delle temperature con AST (FDS + smokeview) .....	6-140
Figura 6-12 – Hangar aviorimessa, disposizione dei sensori AST (smokeview) .....	6-141
Figura 6-13 – Temperature capriata 1_inferiore .....	6-141
Figura 6-14 - Temperature capriata 1_superiore.....	6-141
Figura 6-15 - Temperature capriata 2_inferiore.....	6-142
Figura 6-16 - Temperature capriata 2_superiore.....	6-142
Figura 6-17 - Temperature capriata 3_inferiore.....	6-143
Figura 6-18 - Temperature capriata 3_superiore.....	6-143
Figura 6-19 – Livelli di prestazione per la resistenza al fuoco - .....	6-144
Figura 6-20- Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione Tabella S.2.2 del DM 03/08/2015 (2).....	6-145
Figura 6-21 – Profili di rischio dei beni (Tabella G.3-6 del D.M. Int. 03/08/2015).....	6-145
Figura 6-22- Classe minima di resistenza al fuoco - Tabella S.2.3 del DM 03/08/2015 (2) .....	6-146
Figura 6-23 – Hangar aviorimessa, condizioni di vincolo della capriata .....	6-147
Figura 6-24 – Hangar aviorimessa, capriata secondaria .....	6-148
Figura 6-25 – Hangar aviorimessa- Verifica semplificata del corrente superiore con il nomogramma. ....	6-148
Figura 6-26 – Hangar aviorimessa – Temperatura media del corrente superiore con curva ISO834 .....	6-149
Figura 6-27 – Resistenza dello sforzo assiale di compressione nel domino del tempo, assi principali y-z del corrente superiore.....	6-149
Figura 6-28 – Hangar aviorimessa – Analisi termica della sezione HLS140 – t=1200s / 20min, (Diamond) .....	6-150
Figura 6-29 – Hangar aviorimessa – Collasso strutturale a t=600s (10min) con curva di incendio ISO834 (spostamenti x 1) .....	6-150
Figura 6-30 – Hangar aviorimessa – Diagonali 2x90x6, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ (+ compr, - tens).....	6-150
Figura 6-31 – Hangar aviorimessa – Corrente superiore 2 x 150 x 10, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ (+ compr, - tens).....	6-151
Figura 6-32 – Hangar aviorimessa – Temperatura media ambiente a quota z=12m (smoleview) .....	6-152
Figura 6-33 – Hangar aviorimessa – Temperatura media ambiente a quota z=24m (smoleview) .....	6-152
Figura 6-34 – Temperature medie all'interno della sezione con curve di incendio convenzionali e naturali .....	6-153

Figura 6-35 – Hangar aviorimessa – Diagonali 2x90x6, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ (+ compr, - tens).....	6-154
Figura 6-36 – Hangar aviorimessa – Corrente superiore 2x150x10, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ .....	6-154
Figura 6-37 – Hangar aviorimessa – Corrente inferiore 2x120x10, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ .....	6-154
Figura 6-38 – Hangar aviorimessa – Collasso strutturale a $t=3785s$ (63min) con struttura protetta e curva di incendio ISO834 (spostamenti x 1) .....	6-155
Figura 6-39 – Hangar aviorimessa – Diagonali 2x90x6, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200 $\mu m$ . .....	6-155
Figura 6-40 – Hangar aviorimessa – Corrente superiore 2x150x10, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200 $\mu m$ . .....	6-156
Figura 6-41 – Hangar aviorimessa – Corrente inferiore 2x120x10, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200 $\mu m$ . .....	6-156
Figura 6-42 – Temperature medie all'interno dei diagonali 2x90x6 con curve di incendio e struttura protetta e non protetta.....	6-157
Figura 6-43 – Hangar aviorimessa – Diagonali 2x90x6, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200 $\mu m$ . .....	6-158
Figura 6-44 – Hangar aviorimessa – Corrente superiore 2x150x10, $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200 $\mu m$ . .....	6-159
Figura 6-45 – Hangar aviorimessa: gradiente delle temperature medie in corrispondenza del corrente superiore – $z=24m$ (smokeview) .....	6-162
Figura 6-46 – Hangar aviorimessa: gradiente delle temperature medie lungo l'asse della capriata centrale (smokeview).....	6-162
Figura 6-47 – Spostamenti in mezzeria capriata non protetta - incendio naturale vs ISO834.....	6-166
Figura 6-48 – Spostamenti in mezzeria capriata – incendio naturale.....	6-166

## Indice delle tabelle

Tabella 3-1- Classi di resistenza in funzione del carico d'incendio .....	3-30
Tabella 4-1- configurazioni delle aperture implementate per uno degli scenari .....	4-50
Tabella 5-1 – caratteristiche dell'acciaio derivanti da prove in laboratorio (17) .....	5-71
Tabella 5-2 – Ricerca dei parametri di incendio delle sostanze presenti nel compartimento .....	5-73
Tabella 5-3 – Carichi di incendio Scenario 1 .....	5-75
Tabella 5-4 – Carichi di incendio Scenario 2 .....	5-76
Tabella 5-5 – Riepilogo dei valori di tempo massimo di resistenza al fuoco della struttura in caso di elementi non protetti o protetti con vernici intumescenti .....	5-124
Tabella 5-6 – Classe minima di resistenza richiesta dalla normativa .....	5-126
Tabella 5-7 – Limiti di deformabilità per 'soluzioni conformi' livello di prestazione IV (DM.Int.03/08/2015) (2) .....	5-128
Tabella 6-1 – Costanti termochimiche dei carburanti di maggiore diffusione .....	6-136
Tabella 6-2 – Fattori di sezione e di utilizzo delle sezioni più sollecitate .....	6-148
tabella 6-3 – Riepilogo dei valori di resistenza al fuoco dell'avviorimessa in caso di elementi protetti e non protetti con vernici intumescenti di spessore di 1200 µmm .....	6-164
tabella 6-4 – Livelli di prestazione di resistenza al fuoco dell'avviorimessa in caso di elementi protetti e non protetti con vernici intumescenti di spessore di 1200 µmm .....	6-165
tabella 6-5 – Limiti di deformabilità per 'soluzioni conformi' livello di prestazione IV (DM.Int.03/08/2015) (2) .....	6-165



# **1 Introduzione**

## **1.1 L'ingegneria della sicurezza antincendio**

La sicurezza degli edifici in caso di incendio è lo studio del fenomeno dell'incendio ed il suo effetto sugli occupanti e sulle costruzioni.

I principali obiettivi dell'Ingegneria della Sicurezza Antincendio sono rivolti a garantire la capacità portante delle strutture durante lo sviluppo dell'incendio, a permettere l'esodo delle persone durante l'incendio e a rendere possibili e sicure le operazioni di soccorso.

Tra i materiali da costruzione l'acciaio è uno dei più utilizzati in tutto il mondo; questo è dovuto a numerosi vantaggi offerti da questo tipo di materiale: la rapidità nelle operazioni di costruzione, la possibilità di adottare luci elevate, la leggerezza del materiale ed i bassi costi di costruzione industriali. Inoltre è dotato di un'elevata duttilità strutturale, che rappresenta il modo più efficace per adottare schemi statici in grado di resistere ad eventuali sismi.

Le strutture in acciaio talvolta sono considerate una soluzione poco adatta per il raggiungimento della sicurezza in caso di incendio. I risultati di numerose ricerche, le nuove normative per la progettazione e le soluzioni ormai correntemente adottate per la realizzazione di edifici dimostrano, invece, che esse



possono essere progettate per soddisfare qualunque livello di sicurezza necessario. Oggi questo risultato può essere ottenuto con maggiore facilità.

I criteri di calcolo introdotti nelle più aggiornate normative hanno permesso l'affermazione di una nuova disciplina, l'Ingegneria della Sicurezza Antincendio. La sua applicazione consente l'analisi della sicurezza di qualsiasi soluzione strutturale ed il raggiungimento di un più affidabile concetto di sicurezza in caso di incendio.

Le regole tecniche di Prevenzione Incendi mirano al raggiungimento della sicurezza in caso di incendio degli edifici. In generale il progetto di Prevenzione Incendi di una costruzione è costituito da un insieme integrato di misure di Protezione Attiva e Passiva. Le precauzioni fondamentali da adottare per la prevenzione incendi si rifanno a tre gruppi di azioni:

- limitare le occasioni di innesco di incendio;
- circoscrivere l'incendio e spegnere le fiamme;
- favorire l'esodo delle persone occupanti l'edificio.

La prevenzione dei danni dovuti all'incendio e la mitigazione dei suoi effetti, con riferimento alla salvaguardia della vita umana ed alla tutela dei beni immobili e della proprietà, costituisce il campo disciplinare della "Fire Safety Engineering" o "Ingegneria della Sicurezza Antincendio". Questa è una multi-disciplina volta all'applicazione dei principi della scienza e dell'ingegneria, di leggi e giudizi esperti, basati sulla valutazione scientifica del fenomeno della combustione e degli effetti dell'incendio, e della reazione e del comportamento delle persone all'incendio, finalizzato alla tutela delle persone, alla protezione dei beni e dell'ambiente dagli effetti distruttivi dell'incendio.

Accanto alla Fire Safety Engineering si trovano altre due discipline di prevenzione incendi:

- Fire Protection Engineering, che comprende gli aspetti di protezione attiva e passiva necessari per fornire adeguati livelli di protezione al fuoco sia per l'edificio che per il suo contenuto;
- Structural Fire Engineering, che tratta esclusivamente gli aspetti specifici di protezione passiva, analizzando gli effetti termici del fuoco sugli edifici

e progettando gli elementi per conseguire adeguate capacità di resistenza e per controllare l'espansione dell'incendio.

Il regolamento delle costruzioni Europeo n. 305/2011, emanato dal Parlamento dal Consiglio Europeo (1), nell'allegato I regola i requisiti di base delle opere di costruzione, tra i quali vi sono quelli di sicurezza in caso di incendio.

Il contesto normativo italiano della sicurezza delle costruzioni in caso di incendio vive un periodo di 'passaggio di consegne' tra l'approccio prescrittivo e l'approccio ingegneristico. L'entrata in vigore delle Norme Tecniche di Prevenzione Incendi (D.M.Int. 03/08/2015 - Approvazione e modalità applicative delle norme tecniche di prevenzione incendi (2)) permette l'utilizzo dell'approccio prestazionale sulle attività soggette a controllo di prevenzione incendi da parte dei Vigili del Fuoco (allegato 1 del DPR 151/2011) (3).

Il più grande vantaggio applicativo è che nelle nuove Norme Tecniche di Prevenzione Incendi le soluzioni ottenute applicando l'approccio prestazionale (prima definite "in deroga" rispetto a quelle ottenute con l'approccio prescrittivo) sono considerate paritetiche rispetto a queste ultime: si individuano infatti due percorsi di strategia antincendio, quello delle "soluzioni conformi" (approccio prescrittivo) e quello delle "soluzioni alternative" (approccio ingegneristico), che il progettista può scegliere senza dover istituire la cosiddetta procedura di deroga. L'obiettivo della norma è quello di sostituire nel medio periodo le norme prescrittive con norme prestazionali, sulla base dei dati disponibili nei differenti settori della ricerca della sicurezza antincendio.

L'implementazione di metodi basati sull'approccio ingegneristico (F.S.E. - *Fire Safety Engineering* nella terminologia anglosassone) necessita di uno stato di conoscenza delle tipologie di attività considerate: carico di incendio, probabilità di innesco, tipologia, composizione e localizzazione dei materiali nel compartimento, materiali strutturali e area delle aperture verso l'esterno rappresentano alcuni dei principali parametri con i quali un ingegnere della sicurezza strutturale in condizioni di incendio deve rapportarsi.

In Italia non esistono normative verticali di prevenzione incendi per gli edifici industriali con struttura metallica.

L'individuazione di misure antincendio per questa tipologia di locali presenta delle complessità, dovute alla maggiore vulnerabilità al fuoco dell'acciaio rispetto al calcestruzzo o alla muratura.

Gli edifici industriali sono generalmente caratterizzati da ambienti con volumi importanti e grandi aperture, ed attività quotidiane intense che possono aumentare le probabilità di innesco in certi scenari di incendio.

Tali edifici, per loro natura eterogenei, sono particolarmente adatti ai metodi prestazionali, capaci di cogliere le differenti e particolari configurazioni di ciascuna attività.

Il processo di definizione di parametri, quali i picchi di potenza termica rilasciata e le aree del carico di incendio, merita particolari valutazioni, specie laddove le temperature a cui possono essere esposte le strutture metalliche si rivelano particolarmente elevate, o, al contrario, risultano molto basse e quindi tali da non richiedere particolari sistemi di protezione delle strutture.

## **1.2 Obiettivi della tesi**

Il presente lavoro di Tesi di Dottorato ha quindi lo scopo di approfondire alcuni aspetti legati al rischio di incendio delle strutture metalliche ad uso industriale, con particolare riferimento alle strutture per hangar dell'Aeronautica Militare.

Il primo aspetto esaminato riguarda la definizione degli scenari di incendio che possono svilupparsi negli edifici in oggetto, in dipendenza della loro destinazione d'uso.

Al fine di fare emergere gli effettivi vantaggi dell'approccio ingegneristico, sono stati indagati in particolare i metodi di modellazione del fenomeno incendio, confrontando approcci semplificati con approcci avanzati.

Gli approcci avanzati includono le modellazioni termofluidodinamiche dell'incendio e la valutazione dei suoi effetti sulla sicurezza strutturale mediante opportune modellazioni termo-strutturali, che tengono conto sia del degrado delle caratteristiche meccaniche dei materiali alle alte temperature, sia della variazione

delle sollecitazioni associate alle dilatazioni termiche ed all'iperstaticità strutturale.

Nello specifico sono state effettuate analisi numeriche volte a:

- confrontare le curve di potenza termica suggerite dalle normative, con quelle derivanti da test sperimentali condotti sui materiali;
- studiare i campi di temperatura derivanti dall'applicazione delle curve convenzionali e delle curve naturali di incendio;
- individuare i limiti intrinseci di alcune modellazioni per questa tipologia di edifici;
- studiare la resistenza strutturale in caso di incendio, alla luce dei livelli di prestazione previsti dalle norme.

Lo studio di questi aspetti è in prima istanza ritenuto di interesse per i fini della ricerca scientifica, in particolare relativamente ai metodi che meglio possano descrivere le condizioni di sviluppo dell'incendio e dei suoi effetti su questa tipologia di strutture (edifici industriali o hangar in struttura metallica), si rivolge, inoltre, alle applicazioni ingegneristiche, delineando alcune strategie per il raggiungimento del livello di resistenza strutturale previsto, ed illustrando procedure per il calcolo della resistenza al fuoco delle strutture descritte, strategie pienamente aderenti alla normativa italiana attuale.

## **1.3 Struttura del documento**

Il lavoro compiuto in questa attività di Tesi di Dottorato viene illustrato nei capitoli seguenti secondo uno schema logico che procede da considerazioni generali, fino a aspetti specifici legati alle analisi ed ai risultati raggiunti. La descrizione del fenomeno incendio e delle normative attuali è trattata nel Capitolo 2, con qualche considerazione sull'approccio prescrittivo e sull'approccio prestazionale nel quadro normativo nazionale, ovvero soffermandosi su alcuni aspetti generali che riguardano tutti i soggetti responsabili della sicurezza delle

costruzioni in caso di incendio. Sono di seguito illustrati nel Capitolo 3 i principi sui quali si basa la disciplina detta “*Structural Fire Safety Engineering*” (SFSE) che si occupa degli effetti dell’incendio sulla resistenza al fuoco delle strutture, e nel Capitolo 4 alcuni aspetti dello stato dell’arte sulle analisi termo-meccaniche, quali i metodi ed i software di calcolo utilizzati, Capitolo 4. Questa sezione spiega anche lo sviluppo di un programma di calcolo per il calcolo per la costruzione dei domini di resistenza di sezioni generiche in c.a. e acciaio o composte acciaio-calcestruzzo.

Illustrati i metodi, i principi e le normative di riferimento, si è proceduto a descrivere le strutture oggetto di studio, con la valutazione dei modelli termo-fluidodinamici implementati, i modelli strutturali avanzati e le valutazioni compiute sui livelli di resistenza raggiunti utilizzando differenti strategie antincendio (Capitoli 5 e 6).

Le valutazioni nel merito, di quanto emerso da questi approfondimenti e le conclusioni sono contenute nel Capitolo 7.

## **2 Il rischio incendio nel quadro normativo attuale**

Una legge o un regolamento antincendio si prefigge lo scopo di limitare i danni provocati dall'incendio, permettendo di attuare opere di prevenzione e di utilizzare adeguati dispositivi di protezione attiva e passiva.

I danni provocati dall'incendio possono essere misurati in termini di danni alle persone (feriti e vittime), agli animali, ai beni, all'ambiente e in termini di danni psicologici e sociali (es. perdita di prima casa o di parenti).

Le metodologie con le quali una legge attua i principi dell'antincendio possono variare da Paese a Paese e in funzione delle attività alle quali si rivolgono. \*

Tali normative possono focalizzare il loro ambito di applicazione su una serie di misure atte a diminuire il rischio di incendio attraverso la riduzione di probabilità di accadimento dell'evento pericoloso. Questa strategia è efficace specialmente quando i danni da incendio sono molto elevati (depositi di materiali esplosivi).

Negli anni della rapida crescita e sviluppo dei Paesi occidentali (anni 50 e 60), fattori quali la crescente industrializzazione delle attività e la diffusione di materiali plastici di uso commune, hanno probabilmente aumentato il rischio incendio rendendolo reale e concreto nella quotidianità lavorativa e domestica.

I Paesi industrializzati hanno legiferato in materia antincendio attraverso l'introduzione di normative, dalle quali si possono evincere alcune differenze di impostazione del legislatore, differenze spiegate da aspetti culturali e sociali.

Tali normative, è doveroso ricordarlo, partivano da uno stato di conoscenza del fenomeno incendio sicuramente frammentario, povero di sperimentazione e della conoscenza attuale del fenomeno incendio. Le norme prescrittive sono state probabilmente efficaci, ma non sono molto efficienti in quanto basate su metodi che non si prefiggono l'obiettivo di stabilire misure 'ad hoc'.

Questa separazione concettuale tra efficacia ed efficienza di una norma antincendio pone alcuni interrogativi di carattere ingegneristico e tecnico che coinvolgono un intero *Sistema Paese*. Per una più approfondita disamina sul tema si rimanda alla lettura di (4) riguardo la validità delle normative e la loro efficacia nel panorama nazionale italiano.

## 2.1 Approccio prescrittivo e approccio prestazionale

Gli obiettivi di una norma antincendio sono:

- la salvaguardia della vita umana;
- la protezione dei beni;
- la protezione dell'ambiente.

I metodi con i quali una normativa antincendio raggiunge i prefissati obiettivi possono essere molteplici. Essi dipendono fortemente dal contesto sociale ed economico del Paese, o dei Paesi oggetto della regolamentazione, e tali fattori sono a volte preponderanti su valutazioni tecniche di merito. Questa apparente dicotomia tra tecnica e economia in realtà fornisce stimoli importanti nel settore correlato di ricerca, il quale è orientato sempre maggiormente alla validazione di metodi che a parità di efficacia abbiano maggiore efficienza.

Le leggi ed i regolamenti di tipo prescrittivo sono basati sul raggiungimento degli obiettivi ponendo obblighi e misure minime a seconda delle attività, *presupponendo implicitamente che tali misure facciano conseguire*

*gli obiettivi con un livello accettabile di sicurezza antincendio*, a prescindere da valutazioni ex-post.

Le leggi ed i regolamenti prestazionali (performance based) si basano sulla *misurazione quantitativa degli obiettivi prestabiliti attraverso l'uso di indicatori di prestazioni* (performance's levels). La definizione quantitativa degli obiettivi rende misurabili economicamente le misure antincendio, garantendo, quindi, su scala nazionale, un migliore monitoraggio degli interventi e della loro efficienza, oltre a fornire un concreto supporto alla progettazione, basato sui livelli di prestazione da raggiungere.

## 2.2 Quadro normativo: dal 1961 fino ai nuovi metodi

Indicazioni sull'approccio da seguire nell'affrontare una problematica quale quella della sicurezza in condizioni di incendio, sono riportate in numerose normative, sia nazionali sia europee, che negli ultimi anni hanno subito una forte evoluzione. In un contesto normativo sempre più complesso, è importante fare una panoramica generale di tali norme:

- CIRCOLARE del Ministero dell'Interno N°91 DEL 14-09-1961, "Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile";
- D.M. 30 novembre 1983, "Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi", GU n. 339 del 12 dicembre 1983;
- CNVVF-UNI 9502 (1989), "Procedimento analitico per valutare la resistenza a fuoco degli elementi costruttivi di conglomerato cementizio armato, normale e precompresso";
- CNVVF-UNI 9503 (1989), "Procedimento analitico per valutare la resistenza a fuoco degli elementi costruttivi in acciaio";
- D.M. 10 marzo 1998, "Criteri generali di sicurezza antincendio e per la gestione dell'emergenza nei luoghi di lavoro"



- UNI-CNR (28-12-1999), “Istruzioni per la progettazione di costruzioni resistenti al fuoco”;
- CONSTRUCTION PRODUCT DIRECTIVE (1988), Construction of European Community, December;
- EUROCODICE 1 (2002), “Action on structures – Part 1-2: General Actions – Action on structures exposed to fire”;
- UNI-CNR (28-12-1999), “Istruzioni per la progettazione di costruzioni resistenti al fuoco”;
- EUROCODE 2 (2004), “Design of concrete structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”, March;
- EUROCODE 3 (2005), “Design of steel structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”, December;
- EUROCODE 4 (2005), “Design of Composite Steel and Concrete Structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”, June;
- EUROCODE 5, “Design of Timber Structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”;
- EUROCODE 6, “Design of Masonry Structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”;
- EUROCODE 9, “Design of Aluminium Structures – Part 1-2: General Rules- Structural Fire Design”;
- DECRETO del Ministero dell’Interno del 16 febbraio 2007, “Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione”, GU n. 74 del 29 marzo 2007;
- DECRETO del Ministero dell’Interno del 9 marzo 2007, “Prestazioni di resistenza al fuoco delle costruzioni nelle attività soggette al controllo del Corpo nazionale dei vigili del fuoco”, GU n. 74 del 29 marzo 2007;
- DECRETO del Ministero dell’Interno del 9 maggio 2007, “Direttive per l’attuazione dell’approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio”, GU n. 117 del 22 maggio 2007;
- D.M. 14 gennaio 2008, “NORME TECNICHE PER LE COSTRUZIONI”, supplemento Ordinario della Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana del 4 febbraio 2008, n. 29;

- D.P.R. n. 151 del agosto 2011, “Regolamento recante semplificazione della disciplina dei procedimenti relativi alla prevenzione degli incendi”;
- D.M. 03 agosto 2015, “Nuove norme tecniche di prevenzione incendi”.

### **2.2.1 Circolare 91/1961: un riferimento normativo durato 46 anni.**

In Italia una ‘pietra miliare’ tra i riferimenti normativi sulla sicurezza in condizioni di incendio risale alla circolare n°91 del 14-09-1961 del Ministero dell’Interno “Norme di sicurezza per la protezione contro il fuoco dei fabbricati a struttura in acciaio destinati ad uso civile”. Tale norma, pur essendo destinata ai soli edifici in acciaio, conteneva concetti e misure antincendio allora innovative, quali la quantificazione del carico di incendio, le classi di resistenza al fuoco e gli spessori minimi degli elementi strutturali e non strutturali in funzione della classe d’uso. Tale norma è stata utilizzata per ben 46 anni, fino alla sua tardiva abrogazione (nel 2007). Il motivo della peculiarità di edifici normati era descritto nella circolare stessa: *“con l’aumento della produzione dei materiali ferrosi, che negli ultimi anni ha assunto un ritmo rapidamente crescente, si è reso possibile, anche dal punto di vista economico, l’utilizzazione dei profilati d’acciaio per la costruzione delle strutture portanti anche nelle costruzioni adibite a fini civili. Tale impiego, che se effettuato indiscriminatamente potrebbe determinare gravi pericoli per la stabilità degli edifici in caso di incendio, ha consigliato lo studio e l’emanazione di apposite Norme dirette alla protezione delle persone presenti in tali costruzioni dai pericoli innanzi detti”*. Tale circolare aveva lo scopo di fornire ai progettisti e ai costruttori di fabbricati civili con struttura in acciaio, i criteri per il dimensionamento della protezione contro il fuoco da disporre a difesa delle strutture metalliche. L’attuazione dei criteri della circolare citata garantisce che l’incendio delle materie combustibili nel fabbricato possa esaurirsi prima che le strutture stesse raggiungano temperature tali da comprometterne la stabilità. La

norma si basa principalmente sull'utilizzo di tabelle che forniscono le dimensioni delle pareti taglia-fuoco, lo spessore minimo dei solai, lo spessore minimo di rivestimento richiesto, tipi e spessori dei rivestimenti, rapportati alla classe del piano o del locale cui l'elemento strutturale appartiene. Le classi sono identificate da un numero che esprime la durata minima di resistenza al fuoco (in minuti) richiesta alla struttura o all'elemento costruttivo in esame. Tale classe si determina con una procedura proposta dalla norma stessa legata al carico di incendio, definito, seppur in modo differente, anche nella UNI-CNR (28-12-1999) e nell'EC4 parte 1-2.

### 2.2.2 Decreto Ministeriale del 30 Novembre 1983: la definizione del “REI”

Nel D.M. del 30 novembre 1983 “Termini, definizioni generali e simboli grafici di prevenzione incendi”, viene definito il concetto di resistenza al fuoco come l'attitudine di un elemento da costruzione strutturale o componente, a conservare, secondo un programma termico prestabilito e per un tempo determinato, in tutto o in parte, i seguenti requisiti:

- la stabilità o capacità portante **R**, è l'attitudine di un elemento da costruzione a conservare la resistenza meccanica sotto l'azione del fuoco;
- la tenuta o integrità **E** (dall'espressione francese *Entretenir*, Ermeticità), è l'attitudine di un elemento da costruzione a non lasciar passare né produrre, se sottoposto all'azione del fuoco su un lato, fiamma, vapori o gas caldi sul lato non esposto;
- l'isolamento termico **I**, è l'attitudine di un elemento da costruzione a ridurre, entro un dato limite, la trasmissione del calore.

Dunque il simbolo REI identifica un elemento costruttivo che conserva, per un tempo determinato, la stabilità, la tenuta e l'isolamento termico; il simbolo RE identifica un elemento costruttivo che deve conservare, per un tempo determinato, la stabilità e la tenuta; ed il simbolo R identifica un elemento

costruttivo che deve conservare, per un tempo determinato, il solo requisito di stabilità. Con questi simboli si indicano le classi di resistenza al fuoco degli elementi costruttivi, che vengono richiamati in seguito nella definizione dei livelli di sicurezza, definiti nel D.M. 14 gennaio 2008.

### 2.2.3 La direttiva sui prodotti da costruzione

Con la nascita dell'Unione Europea è nata l'esigenza di uniformare i vari regolamenti, ciò ha determinato l'affermazione di un approccio ingegneristico della sicurezza in caso d'incendio, basato su metodi analitici avallati da verifiche sperimentali. Il primo passo fatto per definire questo approccio è stato la formulazione di ben definiti obbiettivi che permettono di verificare il raggiungimento o meno della sicurezza in caso d'incendio di una struttura. Ciò è stato compiuto dalla Commissione della Comunità Europea, che decise di attuare un programma di azioni nel settore delle costruzioni con l'obiettivo di *armonizzare* le specifiche tecniche. Un importante documento della Commissione della Comunità Europea fu la Direttiva sui Prodotti da Costruzione, pubblicata il 21 dicembre 1989, che imponeva ai prodotti impiegati per la costruzione di edifici ed alle opere di ingegneria civile il soddisfacimento di alcuni requisiti essenziali:

- resistenza meccanica e stabilità;
- sicurezza in caso d'incendio;
- igiene, salute e ambiente;
- sicurezza dell'uso;
- protezione contro il rumore;
- energia, economia e rilascio di calore.

Relativamente alla sicurezza in caso d'incendio attualmente il Regolamento N.305 del 2011 del Parlamento e del Consiglio Europeo stabilisce che le costruzioni devono essere costruite in modo tale che, in caso di sviluppo di un incendio:

- la capacità portante delle strutture sia garantita per un determinato periodo di tempo;
- la produzione e la propagazione di fiamme e di fumi all'interno delle costruzioni sia limitata;
- la propagazione dell'incendio alle costruzioni vicine sia limitata;
- gli occupanti possano abbandonare la costruzione o essere messi in salvo;
- la sicurezza delle squadre di soccorso sia presa in considerazione.

## 2.2.4 Eurocodici

Il progetto in condizioni di incendio viene regolato nelle parti 1-2 degli Eurocodici. In particolare, la parte 1-2 dell'Eurocodice 1 per la definizione dell'azione incendio, la parte 1-2 dell'Eurocodice 2 per le strutture in cemento armato, la parte 1-2 dell'Eurocodice 3 per le strutture in acciaio, la parte 1-2 dell'Eurocodice 4 per le strutture composte acciaio-calcestruzzo, la parte 1-2 dell'Eurocodice 5 per le strutture in legno, la parte 1-2 dell'Eurocodice 6 per le strutture in muratura, la parte 1-2 dell'Eurocodice 9 per le strutture in alluminio. In ciascuna di queste parti sono fornite indicazioni per il progetto e la verifica degli elementi strutturali in caso d'incendio oltre alla descrizione delle proprietà termiche e meccaniche dei materiali. In più sono riportati i metodi per la determinazione del carico d'incendio e delle curve d'incendio, descritti in questo capitolo.

L'impostazione concettuale viene ben sintetizzata nel seguente schema, tratto dall'Eurocodice 1 parte 1-2, ma presente anche in tutte le altre parti 1-2 dei successivi Eurocodici.

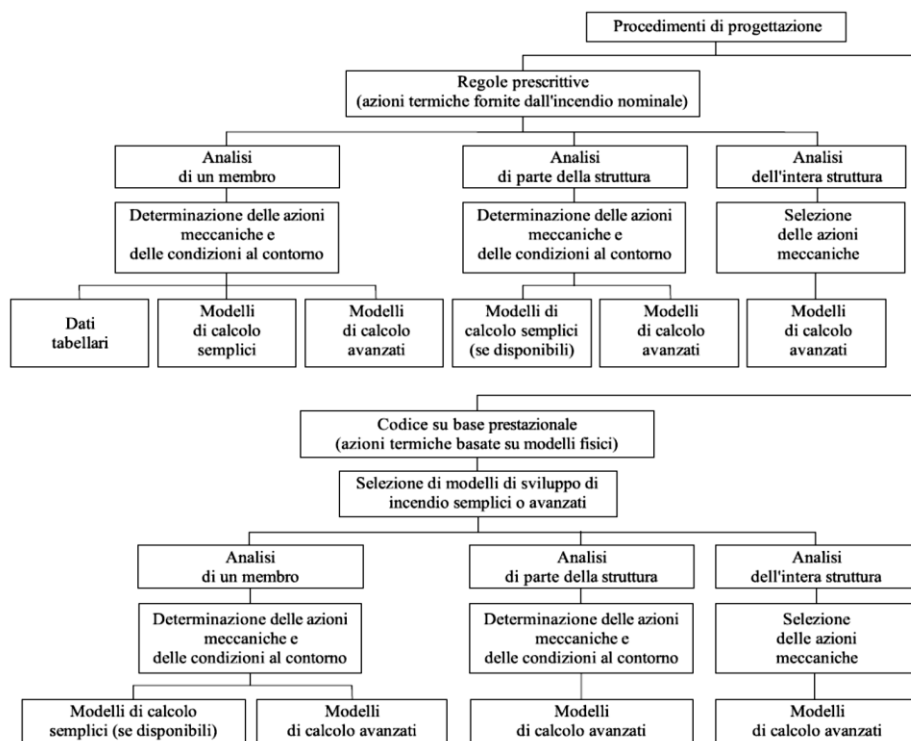


Figura 2-1 - Procedimenti di progettazione secondo l'impostazione degli Eurocodici

## 2.2.5 Requisiti di prestazione ai sensi delle norme tecniche per le costruzioni (DM 14-01-2008)

I requisiti di protezione che derivano dall'applicazione della regola tecnica sono stati studiati in modo da garantire:

- la stabilità degli elementi portanti per un tempo utile ad assicurare il soccorso agli occupanti;
- la limitata propagazione del fuoco e dei fumi, anche nei confronti delle opere vicine;
- la possibilità che gli occupanti lascino l'opera indenni o che vengano soccorsi in altro modo;

- la possibilità per le squadre di soccorso di operare in condizioni di sicurezza.

Questo documento identifica i livelli di sicurezza e le prestazioni delle costruzioni. In particolare esso unifica sia le norme relative al comportamento e alla resistenza dei materiali e delle strutture, sia quelle relative alla definizione delle azioni e dei loro effetti sulle strutture stesse. È bene precisare che la validità del documento è estesa a tutte le costruzioni, ferme restando le eventuali specifiche regole tecniche di prevenzione incendi in vigore per l'attività che si sta analizzando.

Le prestazioni richieste agli elementi di una costruzione sono divise nei seguenti livelli:

- Livello I: nessun requisito specifico di resistenza al fuoco dove le conseguenze del crollo delle strutture siano accettabili o dove il rischio d'incendio sia trascurabile.
- Livello II: requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in un luogo sicuro.
- Livello III: requisiti di resistenza al fuoco delle strutture tali da evitare per tutta la durata dell'incendio il collasso delle strutture stesse.
- Livello IV: requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse;
- Livello V: requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse.

Il primo livello non viene ritenuto adottabile per le costruzioni che ricadono nel campo di applicazione del decreto, cioè le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi.

Il secondo livello è, invece, considerato idoneo e valido per costruzioni isolate, destinate ad un'unica attività aperta al pubblico, dove si verificano tutte le seguenti condizioni:

- eventuali crolli totali o parziali non arrechino danni ad altre costruzioni;

- eventuali crolli totali o parziali non compromettano l'efficacia di elementi di compartimentazione e sistemi antincendio che proteggono altre costruzioni;
- massimo affollamento minore o uguale a 100 persone e densità di affollamento minore o uguale a 0,2 persone per metro quadro;
- costruzione non abilitata ad attività che prevedono posti letto;
- costruzione non abilitata ad attività destinate a malati, anziani, bambini, disabili.

Le costruzioni che rientrano in tale livello devono mantenere i requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente a consentire l'evacuazione degli occupanti verso luoghi sicuri ubicati esternamente alla costruzione. Questo è stato ritenuto possibile se viene conferita una classe di resistenza al fuoco pari a 30 per costruzioni ad un solo piano fuori terra e senza piani interrati, ed una classe e pari a 60 per costruzioni fino a due piani fuori terra ed un piano interrato.

Il terzo livello di prestazione è ritenuto adeguato per tutte le costruzioni che rientrano nel campo di applicazione del decreto (attività soggette ai controlli di prevenzione incendi). È interessante osservare che le costruzioni che rientrano in tale livello devono mantenere i requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza. Affinché ciò sia possibile è stato stabilito che la classe di resistenza al fuoco necessaria è funzione del carico d'incendio specifico di progetto.

Per i livelli quarto e quinto sono richieste prestazioni che garantiscano dopo la fine dell'incendio un limitato danneggiamento delle strutture, ovvero il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse. Questo è possibile per il quarto livello se la capacità portante viene mantenuta per tutta la durata dell'incendio, se il regime deformativo è contenuto e se la capacità portante residua consente interventi di ripristino. Mentre per il livello quinto occorre che la capacità portante venga mantenuta per tutta la durata dell'incendio, che il regime deformativo sia trascurabile e la capacità portante residua sia adeguata alla funzionalità immediata dell'opera.



I livelli di prestazione quarto e quinto possono essere richiesti dal committente, possono essere previsti da capitolati tecnici di progetto oppure possono essere richiesti dalle autorità competenti per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza (quali ad esempio edifici di interesse strategico, edifici per fini di protezione civile, edifici di particolare interesse storico ed artistico).

## **2.2.6 Nuove Norme Tecniche di Prevenzione Incendi D.M.Int. 03/08/2015**

Nel quadro normativo nazionale sono inserite le nuove norme tecniche in materia di prevenzione incendi. Sono state emanate dal Ministero dell'Interno, tramite decreto ministeriale, con un'attività di audit svolta dal corpo nazionale dei VVFF, che ha coinvolto direttamente gli operatori di sicurezza in condizioni di incendio e, tra gli altri, ha coinvolto le Università Italiane.

La norma ha lo scopo di “Semplificare e razionalizzare l'attuale corpo normativo relativo alla prevenzione degli incendi attraverso l'introduzione di un unico testo organico e sistematico di disposizioni di prevenzione incendi applicabili ad attività soggette ai controlli di prevenzione incendi e mediante l'utilizzo di un nuovo approccio metodologico più aderente al progresso tecnologico e agli standard internazionali”.

Gli obiettivi posti alla base della norma sono:

- Disporre di un testo unico in luogo di innumerevoli regole tecniche;
- Semplificare;
- Adottare regole meno prescrittive, più prestazionali e flessibili;
- Fare in modo che le norme VVF si occupino solo di “antincendio”;
- Prevedere la possibilità di scegliere fra diverse soluzioni;
- Favorire l'utilizzo dei metodi dell'ingegneria antincendio.

Essa consta di 5 articoli ed un allegato, che contiene il corpus tecnico normativo di maggiore rilievo:

- Art. 1: Approvazione e modalità applicative delle norme tecniche di prevenzione incendi;
- Art. 2: Campo di applicazione;
- Art. 3: Impiego dei prodotti per uso antincendio;
- Art. 4: Monitoraggio;
- Art. 5: Disposizioni finali.

L'attuale configurazione delle norme ha come campo di applicabilità quello delle "attività soggette" non normate dal DPR n.151/2011, ovvero sprovviste di regola tecnica verticale. La moderna concezione ne consente l'utilizzo indistinto alle attività esistenti e nuove. Inoltre può essere utilizzato come riferimento per garantire la sicurezza di generici locali in condizioni di incendio, cioè per attività non soggette a controllo da parte dei VVF.

Dal punto di vista procedurale tale corpus normativo costituisce in questa prima fase, una normativa 'parallela' per le attività comprese, e non inaugura alcun cambiamento procedurale rispetto agli adempimenti previsti dal DPR 151/2011, nel dettaglio sull'applicabilità:

- è rivolto in questa prima fase (anno corrente 2017), alle sole attività non provviste di regola tecnica verticale;
- non è possibile utilizzarlo per attività per le quali sono vigenti regole prescrittive (es ospedali, hotel, scuole etc.);
- si basa sul principio della 'normazione volontaria', ovvero è possibile seguire le indicazioni in esso contenute per locali per i quali, pur non stanti gli obblighi di legge, vi è la volontà di garantire un dato livello di sicurezza incendi;
- contiene già le indicazioni tecniche per permettere una agevole utilizzo delle soluzioni in 'proroga', in quanto, quando diventerà cogente a tutti gli effetti, sarà di riferimento sia per le soluzioni conformi sia per le soluzioni che le derogano;
- non vi sono differenze di metodologia e approccio per le soluzioni nuove ed esistenti.

Le principali caratteristiche di tale approccio possono essere sinteticamente elencate come:

- Generalità: metodologie comuni applicabili a tutte le attività;
- Semplicità: sono privilegiate soluzioni semplici;
- Modularità: la complessità della materia è scomposta in moduli;
- Flessibilità: ricchezza di soluzioni progettuali;
- Standardizzazione: secondo standard internazionali;
- Inclusione: le diverse disabilità (motorie, sensoriali, cognitive,...) temporanee o permanenti sono parte integrante della progettazione;
- Contenuti basati sull'evidenza: basato sulla ricerca scientifica;
- Aggiornabilità: seguendo il continuo avanzamento tecnologico

Il testo fornisce gli strumenti per stabilire i profili di rischio delle singole attività, e consente, a partire da questi ultimi, di individuare i livelli di prestazione connessi alla tipologia di rischio individuato. Stabiliti i livelli di prestazione, sono fornite le metodologie per raggiungerli utilizzando soluzioni eterogenee (conformi, alternative, in deroga).

Risulta opportuno evidenziare come Il testo sia dotato di 'coerenza interna', ovvero tutte le definizioni ivi richiamate, sono altresì fornite. Infatti tutti termini richiamati devono essere utilizzati così come definiti nel testo, essendo presenti definizioni che possono differire dalle stesse fornite in norme o testi precedenti, sinteticamente le definizioni in rapporto ad altri testi sono:

- simili: lievi differenze, come ad esempio 'spazio a cielo aperto', 'spazio scoperto', 'compartimento';
- differenti: occorre porre attenzione ad alcune di esse quali il calcolo dell'altezza antincendio oppure la descrizione della scala a prova di fumo;
- nuove: esempi quali quota del compartimento, filtro et al.

Le attività sono definite in rapporto alla loro inclusione negli elenchi di attività sottoposte a controllo, e in rapporto alla presenza di regola tecnica verticale:

1. Attività soggetta: attività soggetta ai controlli di prevenzione incendi di competenza del Corpo nazionale dei Vigili del fuoco. (allegato I del D.P.R. 1 agosto 2011 n° 151);
2. Attività con valutazione del progetto: attività soggetta il cui progetto antincendio è valutato, anche in deroga, dal Corpo nazionale dei Vigili del fuoco (incluse le attività soggette di categoria B o C dell'allegato III del DM 7 agosto 2012, per le quali è prevista la valutazione del progetto antincendio, che le attività soggette di categoria A, del medesimo allegato, nel caso in cui il progetto antincendio è sottoposto alla valutazione in deroga secondo le procedure previste dalla vigente normativa);
3. Attività senza valutazione del progetto: attività soggetta il cui progetto antincendio non è valutato, neanche in deroga, dal Corpo nazionale dei Vigili del fuoco (sono incluse nella definizione le attività soggette di categoria A dell'allegato III del DM 7 agosto 2012, non ricomprese nella definizione di cui al comma 2);
4. Attività non normata: attività regolamentata dalla regola tecnica orizzontale;
5. Attività normata: attività provvista di regola tecnica verticale, regolamentata anche dalla regola tecnica orizzontale;
6. Attività esistente: attività in esercizio alla data di entrata in vigore della regola tecnica di riferimento.

In coerenza con l'approccio prestazionale, come indicato nella ISO /TR 16738:2009 e nelle norma inglese di riferimento, la BS 9999:2008, sono individuate le tipologie di rischio alle quali si riferiscono le misure antincendio, la norma italiana in particolare si prefigge lo scopo di:

- salvaguardare la salute e la vita umana (Rischio Vita);
- tutelare i beni ed i patrimoni (Rischio Beni);
- proteggere l'ambiente (Rischio Ambiente).

Alla salvaguardia della vita umana e alla tutela dei beni è possibile associare dei profili quantitativi di rischio, rispetto ai quali è possibile valutare differenti soluzioni progettuali.

La protezione dell'ambiente è affidata ai criteri indicati, non essendo forniti indicatori quantitativi, in quanto in presenza di rischio sensibile, è obbligatorio effettuare delle valutazioni specifiche nel merito. Tale approccio sul rischio ambiente è specifico per il caso italiano, e risulta utile specificare come sia pienamente conforme alle valutazioni ambientali previste dal codice ambiente Dlsg n.152 del 3 aprile 2006 e s.m.i., alle quali sono per legge sottoposte le opere che hanno considerevole impatto sull'ambiente preesistente, ivi compreso il rischio di incendio derivante dalla nuova attività.

Nelle nuove norme tecniche ogni prestazione antincendio è distinta dalle altre, all'interno dell'allegato I è possibile stabilire per ciascuna misura (reazione al fuoco, compartimentazione, resistenza al fuoco etc.) i profili di rischio e i conseguenti criteri di attribuzione, correlate alla categoria di soluzioni.

Le tipologie di soluzioni si distinguono in:

- soluzioni conformi, sono le soluzioni di immediata applicazione progettuale nei casi previsti, garantendo il raggiungimento del livello di prestazione connesso;
- soluzioni alternative, sono soluzioni per le quali è necessario dimostrare il raggiungimento del collegato livello di prestazione impiegando i metodi di progettazione della sicurezza antincendio ammessi;
- soluzioni in deroga, sono soluzioni richieste nel caso si sia attivato il procedimento di deroga previsto dalla normativa vigente, ovvero il progettista è tenuto a dimostrare il raggiungimento degli obiettivi di sicurezza antincendio impiegando i metodi ammessi.

La scelta del tipo di soluzione è legata alla categoria del progetto secondo l'allegato I del DPR 151/2011, in particolare le soluzioni alternative sono utilizzabili quando è prevista la valutazione del progetto, ovvero categoria B o C, mentre le soluzioni in deroga comprendono anche la categoria A, qualora sia appunto in deroga.

## 2.3 NFPA 409 (National Fire Protection Association “Standard on Aircraft Hangars”)

La norma tecnica di riferimento per le aviorimesse, negli Stati Uniti, è stata emanata dall'NFPA (National Fire Protection Association), il quale è un autorevole riferimento internazionale nel campo dell'antincendio, svolgendo attività normativa, di ricerca e supporto a tutti gli aspetti legati al rischio incendio nelle infrastrutture. Negli Stati Uniti vige il principio della normazione volontaria, pertanto tale norma è applicabile dai soggetti, pubblici o privati, che vogliano dotarsi di un insieme di misure atte a garantire sufficiente livello di sicurezza in caso di incendio.

Sinteticamente essa fornisce i requisiti minimi antincendio per la piena funzionalità degli hangar, 4 sottogruppi con i relativi criteri di attribuzione “gruppo I”: una sola delle caratteristiche elencate:

- Altezza del portale di accesso  $H > 8,5\text{m}$ ;
- Area di incendio singola eccedente  $40.000\text{ ft}^2$  ( $3716\text{ mq}$ );
- Predisposizione per stazionamento aeromobile con altezza in coda  $h > 8,5\text{m}$ .

Il “gruppo II” deve soddisfare tutte le caratteristiche:

- Porta di accesso  $H \leq 8,5\text{ m}$ ;
- Area di incendio singola compresa tra valori specifici dipendenti da valori tabellati.

Gli altri due gruppi sono assegnati a seconda delle tipologie costruttive, così come definite in NFPA 220.

Un hangar è del “gruppo III” qualora non ricada negli altri 2 gruppi e soddisfi i seguenti requisiti:

- Porta di accesso  $H \leq 8,5\text{m}$
- Area di incendio singola compresa tra valori specifici tabellati.

Il “gruppo IV” comprende gli hangar di struttura in acciaio e copertura a membrana.

Gli altri capitoli della norma riguardano aspetti correlati alle misure di protezione da adottare, delle tipologie di manutenzioni da effettuare al fine di mantenere il requisito di sicurezza in condizioni di incendio per gli hangar, quali:

- misure di protezione attiva e passiva riferite ai differenti gruppi;
- misure da adottare negli hangar verniciatura;
- ispezioni e test da fare per il piano di manutenzione.

Le prescrizioni dell’NFPA si adottano a seconda del gruppo in cui ricade l’hangar e della tipologia costruttiva (queste ultime fanno riferimento alla NFPA 220).

## 2.4 Alcune considerazioni sulle normative

La sicurezza in caso di incendio nelle costruzioni coinvolge settori scientifici eterogenei, dell’analisi del comportamento dei materiali al variare delle temperature, allo studio del fenomeno dell’incendio sotto l’aspetto chimico e fisico, inclusa l’ingegneria strutturale applicata all’incendio.

Un importante ruolo nella sicurezza incendio è rappresentato dalla *prevenzione*, la quale può essere attuata su distinti livelli. Al primo ‘gradino’ vi è il corretto comportamento da parte di chi utilizza gli ambienti ed è correlata ad alcuni fattori culturali quali la formazione del personale o la percezione del rischio dell’incendio in quelle zone, dovuta a tassi di accadimento particolarmente elevati o a materiali già noti come molto pericolosi. Al gradino più elevato si trovano le leggi e le normative, in contesti nazionali o internazionali, che hanno il preciso scopo di ridurre i danni causati dagli incendi, con metodi *economicamente sostenibili dalla comunità*.

La sicurezza in caso di incendio delle costruzioni ha lo scopo di proteggere la vita umana, i beni materiali e l’ambiente circostante.

Esistono differenti metodi complementari di prevenzione, di protezione passiva e di protezione attiva, che riguardano i materiali, le strutture, gli impianti, le procedure di sicurezza e le limitazioni di esercizio.

Una corretta attività di prevenzione incendi di una costruzione è costituita da un insieme integrato di misure dette di Protezione Attiva e di misure dette di Protezione Passiva. Riferendosi all'attività di progettazione antincendio dell'edificio, risulta indispensabile:

- l'uso, per quanto possibile, di materiali non infiammabili;
- l'adozione di sistemi di allarme e di spegnimento automatico;
- la predisposizione di sistemi di vie di uscita.

In teoria se un edificio potesse essere realizzato completamente con strutture resistenti al fuoco e materiali secondari non infiammabili sarebbe evitata ogni possibilità di incendio.

Tuttavia gli interventi devono essere *sostenibili economicamente*, occorrono, quindi, scelte che siano non solo efficaci ma soprattutto efficienti. La cultura della progettazione antincendio in un 'sistema paese' è un obiettivo non semplice da raggiungere, ma misurabile direttamente negli interventi di progetto, poiché sovente non è posta alcuna attenzione nella scelta degli elementi costruttivi, nella loro esposizione ai carichi di incendio e nella riduzione dei carichi di incendio.

In caso di incendio, idonei impianti di allarme e di spegnimento automatico dovrebbero essere in grado di intervenire prima che il fenomeno dilaghi in maniera incontrollabile (tali dispositivi rientrano nella strategia di protezione attiva). I sistemi di allarme hanno la duplice funzione di avvisare le persone in tempo per consentire loro di raggiungere la salvezza in un luogo sicuro e in uno spazio aperto, e di fare in modo che l'intervento sul focolaio di incendio sia abbastanza tempestivo.

L'impiego di mezzi di spegnimento, siano essi portatili come estintori o fissi come idranti, richiede la presenza continua di personale, anche non specificatamente destinato a tale mansione, ma sensibilizzato ed addestrato ad intervenire in caso di emergenza e in grado di adoperare i mezzi di spegnimento. Adoperare un estintore è una attività di una certa semplicità, ma richiede un



minimo di conoscenza e di addestramento tali da far superare quegli istanti di indecisione che possono essere fatali in presenza di fuoco.

Quando non si prevede la presenza di personale di sorveglianza incendio come nelle zone a rischio specifico, quali le centrali termiche, le autorimesse, i depositi di materiali infiammabili, occorre prevedere l'installazione di un impianto di spegnimento automatico.

Per limitare le eventualità di inizio di un incendio occorre verificare con molta attenzione la presenza di fiamme libere e, qualora non sia possibile impedirne l'uso, comunque ridurre il carico di incendio.

Occorre, inoltre, osservare i livelli di ventilazione naturale o artificiali prescritti dalle norme in tutti i locali ove si manipolano o si tengono in deposito sostanze liquide o gassose infiammabili che potrebbero dare luogo alla formazione di miscele auto innescanti o esplosive.

La prevenzione dell'innescò coinvolge gli impianti elettrici di approvvigionamento ed uso negli ambienti. Altra misura valida è costituita dalla compartimentazione dei locali, in modo da evitare la propagazione dei fumi e delle fiamme verso le aree circostanti.

Spegnere il principio di incendio prima che dilaghi è un obiettivo fondamentale, che può essere perseguito predisponendo in primo luogo dei rilevatori di fumo o di fiamme collegati a presidi fissi. In cui vi sia sempre un personale qualificato, o anche, nelle zone a maggior rischio, installando impianti di spegnimento automatico. E infine favorire l'esodo delle persone presenti nell'edificio, attraverso percorsi detti appunto vie di fuga, naturalmente, avvertendole tempestivamente con opportuni impianti di allarme. La definizione di vie di fuga preferenziali è un requisito specificatamente progettuale e che dimostra la capacità del progettista di concepire un'architettura nella quale le vie di fuga siano chiaramente individuabili e di rapida percorribilità.

Come detto in precedenza dal punto di vista ingegneristico ciò che interessa è il comportamento della struttura in caso di incendio. Un incendio di intensità tale da causare danni alle strutture portanti di una costruzione ha il carattere di un evento eccezionale, in quanto la probabilità di accadimento è da considerarsi

statisticamente bassa; pertanto l'azione incendio rientra nella categorie delle azioni eccezionali.

L'acciaio e il conglomerato cementizio non sono materiali combustibili ma, durante l'incendio, subiscono danneggiamenti progressivi, che sono funzione sia del valore massimo della temperatura raggiunta, sia della durata di esposizione alle alte temperature. A causa di questi danneggiamenti, la capacità di prestazione delle sezioni resistenti diminuisce fino ad uguagliare la domanda di prestazione, dovuta ai carichi di esercizio presenti durante l'incendio, allora lo stato limite ultimo di resistenza è raggiunto e la sezione va in crisi. La protezione degli elementi strutturali, con rivestimenti isolanti, ha l'effetto di rallentare il processo di riscaldamento dell'elemento strutturale, così da aumentare il tempo occorrente perché si raggiunga la situazione di crisi. È altresì chiara la correlazione tra sicurezza strutturale e durata dell'intervallo di tempo necessario affinché il compartimento pervenga al collasso: quanto maggiore è tale intervallo, tanto maggiore è la probabilità che, sia le operazioni di estinzione dell'incendio che l'evacuazione dall'edificio degli occupanti, possono esplicarsi con successo, prima del raggiungimento della crisi delle sezioni resistenti e della struttura nel suo complesso.

### 3 Structural Fire Safety Engineering

Sono di seguito sinteticamente esposte le principali metodologie per la modellazione dell'incendio alla luce delle indicazioni fornite dalle normative vigenti.

#### 3.1 Carico di incendio

Il carico d'incendio rappresenta, con il suo valore, un parametro che segnala la pericolosità del possibile incendio; quanto maggiore è il carico di incendio tanto maggiore è la gravità dell'incendio. I valori del carico di incendio specifico di progetto,  $q_{f,d}$ , sono determinati con la seguente relazione, riportata nelle “Norme Tecniche per le costruzioni”, che risulta leggermente differente da quella definita nelle nuove norme tecniche [2]:

$$q_{f,d} = q_f \cdot m \cdot \delta_{q1} \cdot \delta_{q2} \cdot \delta_n \quad (3-1)$$

dove:

- $m$  fattore di combustione, deve essere compreso tra 0.8 e 1.0;

- $\delta_{q1}$  è un fattore che tiene conto del rischio di attivazione in relazione alla dimensione del compartimento, tale fattore, definito nella tabella E.1 dell'EC1 parte 1-2 appendice, deve essere maggiore o uguale a 1.0;
- $\delta_{q2}$  è un fattore che tiene conto del rischio di attivazione in relazione al tipo di attività svolta nel compartimento, tale fattore, definito nella tabella E.1 dell'EC1 parte 1-2 appendice E, deve essere maggiore o uguale a 0.8;
- $\delta_n$  è un fattore che tiene conto delle differenti misure di spegnimento dell'incendio (sprinkler, rivelatori, squadre antincendio, ecc.), tale fattore, definito nella tabella E.1 dell'EC1 parte 1-2 appendice E, si ottiene come segue:

$$\delta_n = \sum_{i=1}^{10} \delta_{ni} \geq 0.20 \quad (3-2)$$

- $q_f$  è un valore caratteristico della densità del carico di incendio per unità di area in pianta [ $\text{MJ}/\text{m}^2$ ]. Tale valore caratteristico del carico di incendio specifico può essere individuato in base alla destinazione d'uso come riportato sia nel prospetto B.I all'appendice B della UNI-CNR (1999) che nella tabella E.4 dell'EC1 parte 1-2 oppure, sempre secondo la UNI-CNR, come segue:

$$q_f = \frac{\sum_i M_i \cdot H_{u,i} \cdot m_i \cdot \psi_i}{A} \quad (3-3)$$

in cui:

- $M_i$  è la quantità del singolo materiale combustibile [ $\text{Kg}$ ];
- $H_{u,i}$  potere calorifico inferiore del singolo materiale [ $\text{MJ}/\text{Kg}$ ];
- $m_i$  fattore che descrive la partecipazione alla combustione del singolo materiale combustibile; in assenza di precise determinazioni si assume pari a 1.0;
- $\psi_i$  è un fattore che descrive la protezione dal fuoco del singolo materiale combustibile; per materiali contenuti in contenitori

appositamente progettati per resistere al fuoco si assume  $\psi_i = 0$ ; per materiali contenuti in contenitori non combustibili e non appositamente progettati per resistere al fuoco si assume  $\psi_i = 0.85$ ; in tutti gli altri casi  $\psi_i = 1$ ;

- A è la superficie planimetrica netta del compartimento [ $\text{m}^2$ ].

Un procedimento analogo è riportato nell'EC1 parte 1-2 appendice E. Nella definizione del carico di incendio compare il potere calorifico dei materiali combustibili che è la quantità di calore che viene prodotta dalla combustione completa dell'unità di peso di un combustibile. Questo si distingue in potere calorifico inferiore e potere calorifico superiore a secondo che l'acqua, formata per combustione dell'idrogeno eventualmente presente nel combustibile, si consideri allo stato di vapore o di liquido. La differenza tra i due tipi di potere calorifico corrisponde appunto al calore di vaporizzazione dell'acqua formatasi nella combustione. Nella pratica interessa maggiormente il potere calorifico inferiore perché le temperature raggiunte dai fumi sono sempre tali che l'acqua sia presente sottoforma di vapore.

Per la valutazione del livello di prestazione III, è importante conoscere il carico di incendio, perché i valori di riferimento della capacità portante sufficiente a garantire tale livello sono forniti in funzione del carico di incendio specifico di progetto  $q_{f,d}$ , come si vede tabella 1-1, presente sia nella UNI-CNR (1999) che nelle “Norme Tecniche per le costruzioni, 2008” (5):

*Tabella 3-1- Classi di resistenza in funzione del carico d'incendio*

Carichi d'incendio specifici di progetto ( $q_{f,d}$ )	Capacità portante	
	Classe minima	Classe di riferimento
Non superiore a 150 MJ/m <sup>2</sup>	R15	R15
Non superiore a 200 MJ/m <sup>2</sup>	R15	R20
Non superiore a 300 MJ/m <sup>2</sup>	R15	R30
Non superiore a 450 MJ/m <sup>2</sup>	R30	R45
Non superiore a 600 MJ/m <sup>2</sup>	R30	R60

Non superiore a 900 MJ/m <sup>2</sup>	R45	R90
Non superiore a 1200 MJ/m <sup>2</sup>	R60	R120
Non superiore a 1800 MJ/m <sup>2</sup>	R90	R180
Superiore a 1800 MJ/m <sup>2</sup>	R120	R240

## 3.2 Requisiti di prestazione di Resistenza al fuoco

I livelli di sicurezza e le prestazioni delle costruzioni sono quantificabili definendo dei parametri, in base ai quali poter quantificare e misurare la prestazione di sicurezza incendio in rapporto al rischio di incendio.

Utilizzando l'approccio ingegneristico in Italia le prestazioni richieste agli elementi di una costruzione sono divise nei seguenti livelli:

- Livello I: nessun requisito specifico di resistenza al fuoco dove le conseguenze del crollo delle strutture siano accettabili o dove il rischio d'incendio sia trascurabile.
- Livello II: requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per un periodo sufficiente a garantire l'evacuazione degli occupanti in un luogo sicuro.
- Livello III: requisiti di resistenza al fuoco delle strutture tali da evitare per tutta la durata dell'incendio il collasso delle strutture stesse.
- Livello IV: requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento delle strutture stesse;
- Livello V: requisiti di resistenza al fuoco delle strutture per garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse.

Il primo livello non viene ritenuto adottabile per le costruzioni che ricadono nel campo di applicazione del decreto, cioè le attività soggette ai controlli di prevenzione incendi.

Il secondo livello è, invece, considerato idoneo e valido per costruzioni isolate, destinate ad un'unica attività aperta al pubblico, dove si verificano tutte le seguenti condizioni:

- eventuali crolli totali o parziali non arrechino danni ad altre costruzioni;
- eventuali crolli totali o parziali non compromettano l'efficacia di elementi di compartimentazione e sistemi antincendio che proteggono altre costruzioni;
- massimo affollamento minore o uguale a 100 persone e densità di affollamento minore o uguale a 0,2 persone per metro quadro;
- costruzione non abilitata ad attività che prevedono posti letto;
- costruzione non abilitata ad attività destinate a malati, anziani, bambini, disabili.

Le costruzioni che rientrano in tale livello devono mantenere i requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente a consentire l'evacuazione degli occupanti verso luoghi sicuri ubicati esternamente alla costruzione. Questo è stato ritenuto possibile se viene conferita una classe di resistenza al fuoco pari a 30, per costruzioni ad un solo piano fuori terra e senza piani interrati ed una classe pari a 60, per costruzioni fino a due piani fuori terra ed un piano interrato.

Il terzo livello di prestazione è ritenuto adeguato per tutte le costruzioni che rientrano nel campo di applicazione del decreto (attività soggette ai controlli di prevenzione incendi). È interessante osservare che le costruzioni che rientrano in tale livello devono mantenere i requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la gestione dell'emergenza. Affinché ciò sia possibile è stato stabilito che la classe di resistenza al fuoco necessaria è funzione del carico d'incendio specifico di progetto.

Per i livelli quarto e quinto, in analogia a quanto disposto dal decreto 14 Settembre 2005, vengono richieste prestazioni che garantiscano dopo la fine dell'incendio un limitato danneggiamento delle strutture, ovvero il mantenimento della totale funzionalità delle strutture stesse. Questo è possibile per il quarto livello se la capacità portante viene mantenuta per tutta la durata dell'incendio, se il regime deformativo è contenuto e se la capacità portante residua consente

interventi di ripristino. Mentre per il livello quinto occorre che la capacità portante venga mantenuta per tutta la durata dell'incendio, che il regime deformativo sia trascurabile e la capacità portante residua sia adeguata alla funzionalità immediata dell'opera. I livelli quarto e quinto di prestazione possono essere richiesti dal committente, possono essere previsti da capitoli tecnici di progetto oppure possono essere richiesti dalle autorità competenti per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza.

### **3.3 Criteri per la determinazione d'incendi naturali**

Il documento “Criteri di sicurezza per gli edifici basati sugli incendi naturali” (2001) raccoglie i risultati della ricerca “Natural Fire Safety Concept”, il cui scopo è di stabilire un approccio realistico e credibile per l'analisi della sicurezza strutturale di edifici in caso di incendio tenendo conto delle misure di protezione attiva presenti e delle reali caratteristiche dell'incendio.

Nella ricerca è stata sviluppata una procedura che:

- tiene conto delle caratteristiche dell'edificio che influenzano lo sviluppo dell'incendio quali lo scenario dell'incendio, il carico di incendio, il tasso di pirolisi, le caratteristiche del compartimento e le condizioni di ventilazione;
- quantifica il rischio di innesco dell'incendio e tiene conto delle misure di protezione attiva e del tipo di attività presenti, questa analisi del rischio è basata sulla probabilità dedotta da database di incendi reali verificatisi in Svizzera, Francia, Finlandia e Regno Unito;
- deduce, sulla base dei punti precedenti, i valori di progetto dei principali parametri, come il carico di incendio;
- in funzione del carico di incendio di progetto determina la curva di riscaldamento di progetto, che implicitamente tiene conto del rischio di incendio e quindi delle misure di protezione attiva;



- simula il comportamento globale della struttura soggetta alla curva di riscaldamento di progetto ed ai carichi statici previsti in caso di incendio;
- deduce il tempo di resistenza al fuoco; e spesso può risultare che la struttura sia capace di sopportare le sollecitazioni per l'intera durata dell'incendio, compresa la fase di raffreddamento;
- verifica la sicurezza della struttura mediante la comparazione tra il tempo di resistenza al fuoco ed il tempo richiesto che dipende sia dal tempo di evacuazione che dalle conseguenze in caso di collasso strutturale.

Sia i vantaggi economici, sia il più efficace controllo della sicurezza di questo nuovo approccio, favoriscono la sua applicazione a nuovi casi reali. In tal modo, saranno risparmiati quegli investimenti che oggi vengono impiegati per garantire la resistenza di strutture soggette, per esempio, a due ore di un incendio ISO (o ASTM) poco realistico. Infatti può risultare più efficace predisporre opportune misure attive, che assicurano anche protezione per le persone, come i sistemi di rilevazione, gli allarmi, la trasmissione automatica dell'allarme ai Vigili del Fuoco, i sistemi di evacuazione dei fumi e gli impianti di spegnimento automatico (sprinkler). Anche la struttura potrà beneficiare di quelle misure che hanno lo scopo di garantire la sicurezza delle persone e quindi, i costi necessari per assicurare la sua stabilità in caso di incendio saranno sensibilmente ridotti.

Tale procedura è perfettamente compatibile con le impostazioni degli eurocodici; infatti, definito l'incendio naturale, il campo di temperatura negli elementi della struttura portante viene ottenuto mediante l'applicazione dell'EC1 parte 1-2, mentre il comportamento strutturale può essere analizzato utilizzando le parti 1-2 dell'Eurocodice 3 per le strutture in acciaio e l'Eurocodice 4 per le strutture composte. A conferma di ciò, nell'ultima versione dell'Eurocodice 1 parte Fuoco, ci sono degli annessi che fanno riferimento al tipo di approccio proposto in tale ricerca.

### **3.4 Modelli d'incendio**

In genere, i fattori che influenzano la severità di un incendio in un compartimento possono riassumersi come segue:

- tipologia del carico d'incendio;
- densità e distribuzione del carico d'incendio;
- attitudine alla combustione dei materiali che costituiscono il carico d'incendio;
- dimensione e geometria del compartimento;
- condizioni di ventilazione nel compartimento.

Il raggiungimento del flashover in un compartimento incendiato induce una transizione allo sviluppo dell'incendio. Dopo tale punto l'incendio coinvolge l'intero compartimento, le temperature salgono rapidamente il fenomeno è difficilmente controllabile. Per tale motivo, molti modelli d'incendio sono suddivisi in pre-flashover e post-flashover. Molti di questi modelli sono anche riportati nell'Eurocodice 1 parte 1-2, tra cui:

- Curve d'incendio nominale;
- Metodo del tempo equivalente;
- Curve d'incendio parametriche;
- Incendio localizzato, tipico degli incendi pre-flashover;
- Incendio di elementi esterni al compartimento;
- Modelli a zone, che si distinguono in modelli ad una sola zona per gli incendi pre-flashover e a due zone per gli incendi post-flashover.

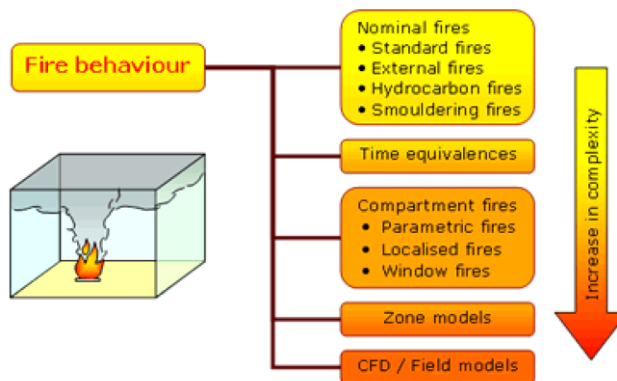


Figura 3-1 - Opzioni per la modellazione dell'incendio [Bailey (2004)]

Nei modelli semplici, la temperatura del gas nel compartimento viene assunta uniforme e rappresentata attraverso la relazione tempo temperatura. In questi casi il movimento del fumo e la propagazione delle fiamme non sono considerati, pertanto questi metodi sono più adatti per gli incendi post-flashover.

I modelli d'incendio più avanzati sono di norma modelli teorici computerizzati che simulano il trasferimento di calore e di massa associato ad un compartimento incendiato. Questi programmi possono prevedere la temperatura dei gas nel compartimento in maniera più dettagliata e potrebbero anche tenere conto del movimento del fumo e delle fiamme.

### 3.5 Curve d'incendio nominali

Nel caso di incendio di materiali combustibili prevalentemente di natura cellulosica la curva di incendio nominale di riferimento è la curva nominale standard ISO834 la cui espressione è la seguente:

$$\theta = \theta_0 + 345 \cdot \log_{10}(8 \cdot t + 1)$$

in cui:

- $\theta_0$  è la temperatura iniziale dell'aria nel compartimento, in genere 20 °C;
- $\theta$  è la temperatura dell'aria durante l'incendio;

- 't' è il tempo di esposizione al fuoco espresso in minuti primi.

A differenza dell'andamento della curva reale la curva standard prevede l'aumento monotono della temperatura col tempo di esposizione.

Nel caso di incendi di quantità rilevanti di idrocarburi o altre sostanze con equivalente velocità di rilascio termico, la curva di incendio nominale standard può essere sostituita con la curva nominale degli idrocarburi seguente:

$$\theta = 1080 \cdot (1 - 0,325 \cdot e^{-0,167 \cdot t} - 0,675 \cdot e^{-2,5 \cdot t}) + \theta_0$$

Nel caso di incendi sviluppatasi all'interno del compartimento, ma che coinvolgono strutture poste all'esterno, per queste ultime la curva di incendio nominale standard può essere sostituita con la curva nominale esterna seguente:

$$\theta = 660 \cdot (1 - 0,687 \cdot e^{-0,32 \cdot t} - 0,313 \cdot e^{-3,8 \cdot t}) + \theta_0$$

Gli andamenti nel tempo delle tre curve sopra riportate sono rappresentati rispettivamente nelle tre figure che seguono.

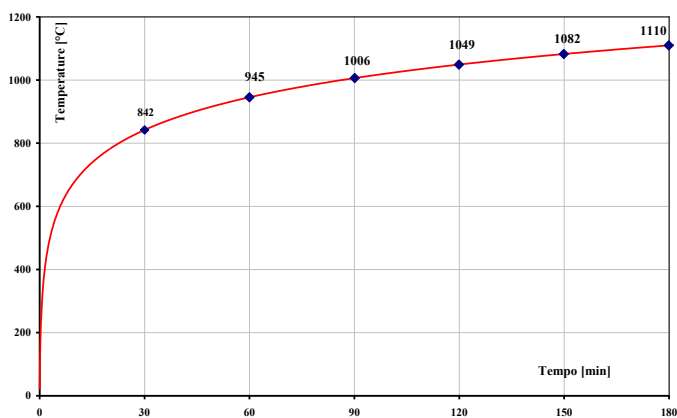
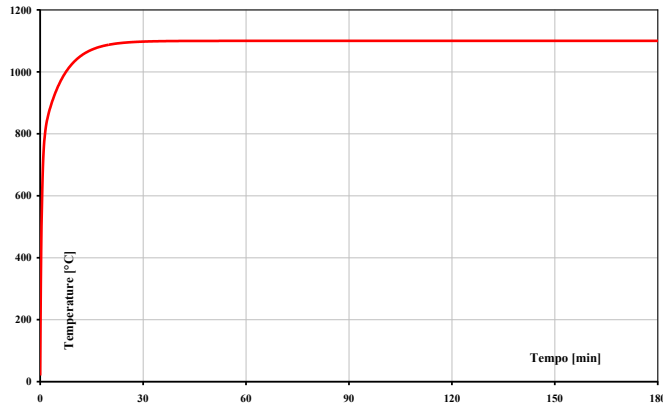
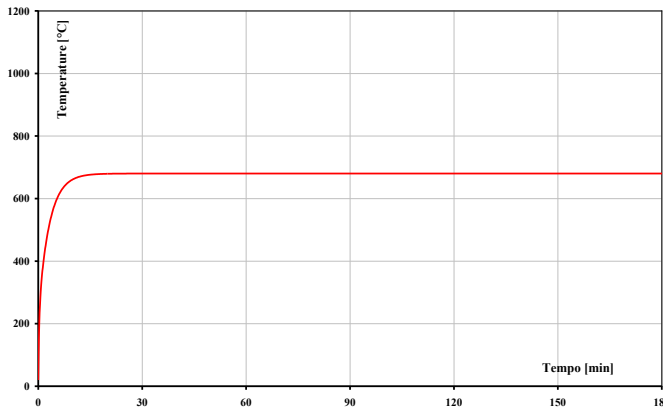


Figura 3-2 Curva d'incendio standard – ISO 834 (6)



*Figura 3-3 - Curva nominale degli idrocarburi*



*Figura 3-4 - Curva nominale per ambienti esterni*

Agli elementi strutturali e alle strutture viene attribuita la classe corrispondente o immediatamente inferiore al tempo, espresso in minuti primi, per il quale la struttura stessa garantisce una sufficiente capacità portante sotto l'azione termica della curva nominale e sotto le altre azioni di progetto.

### 3.6 Curve d'incendio parametriche

Per ottenere curve di incendio naturali, è possibile scegliere tra modelli semplificati e modelli avanzati. I primi sono basati su incendi di progetto, con un limitato campo di applicazione, con specifici parametri fisici, i secondi si basano

modellazioni termo-fluidodinamiche che servono a caratterizzare il fenomeno dell'incendio fornendo più informazioni. Il metodo delle curve d'incendio parametriche fornisce un metodo di approssimazione del comportamento dell'incendio in un compartimento piuttosto semplice. Si basa sull'ipotesi che la temperatura sia uniforme all'interno del compartimento incendiato. Una curva parametrica tiene in conto la dimensione del compartimento, il carico d'incendio, le condizioni di ventilazione e le proprietà termiche dei muri e del soffitto del compartimento. Se confrontata con la curva d'incendio standard, la curva parametrica dà una stima più realistica della severità dell'incendio nel compartimento considerato.

L'uso delle curve parametriche è molto utile per quei casi in cui la densità del materiale combustibile è scarso, per cui usando la curva ISO 834 si andrebbe troppo a vantaggio di sicurezza.

Come si nota in Figura 3-5, una curva parametrica consta di una fase di riscaldamento rappresentata da una curva esponenziale fino a una temperatura massima, seguito da una fase di raffreddamento lineare fino ad una temperatura residua, generalmente pari a quella dell'ambiente. L'intensità dell'incendio, cioè la massima temperatura raggiunta, e la durata complessiva del fenomeno sono i parametri che influenzano maggiormente il comportamento della struttura durante l'incendio, pertanto sono stati adottati come parametri principali in tale formulazione.

La relazione tra la temperatura dei gas e il tempo deve anche avere una fase di raffreddamento per impedire che la temperatura nei calcoli raggiunga un valore irragionevole. In funzione del valore del  $t^*_{max}$ , la temperatura dei gas subisce una diminuzione secondo una legge lineare.

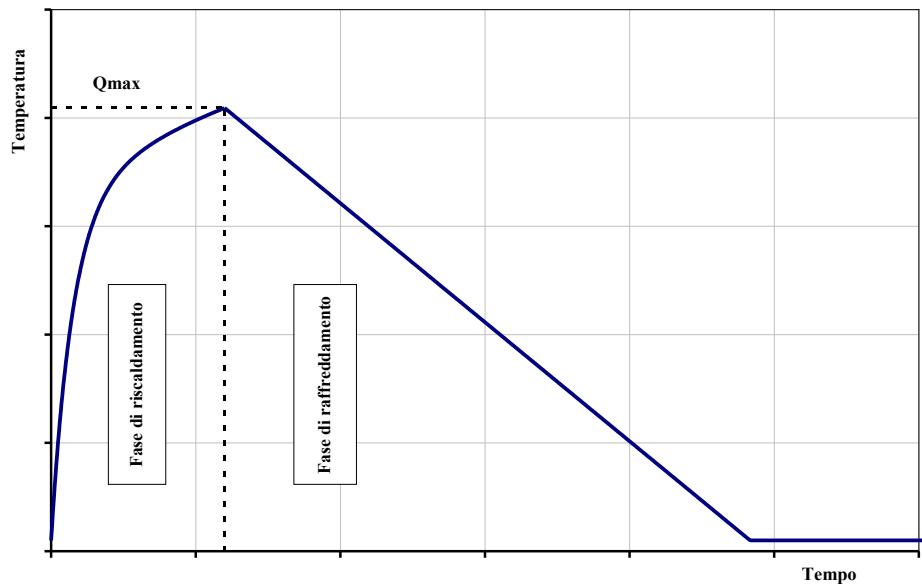


Figura 3-5 - Curva d'incendio parametrica

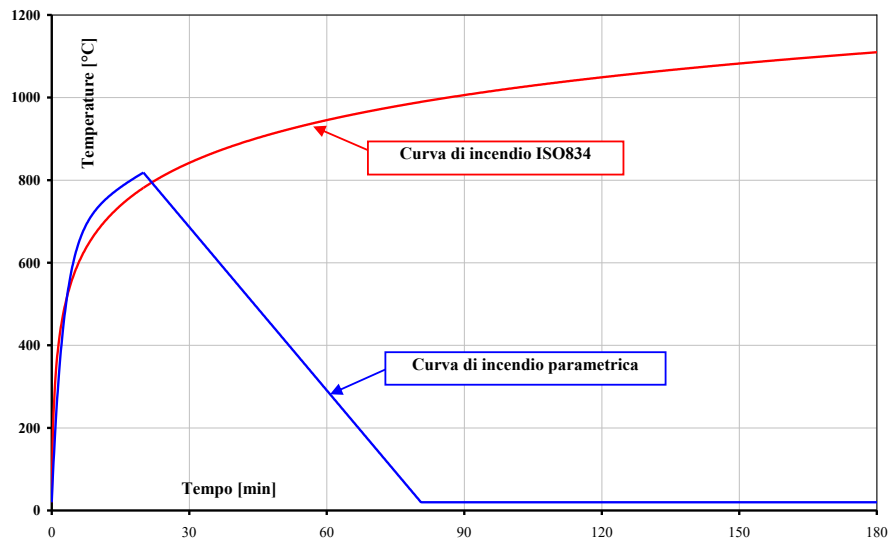


Figura 3-6 - Confronto tra una curva d'incendio parametrica e curva ISO834

## **3.7 Caratteristiche termiche e meccaniche dei materiali da costruzione sottoposti a incendio**

### **3.7.1 Caratteristiche termiche**

Le caratteristiche termiche dei materiali sono riportate nei rispettivi Eurocodici, nelle relative parti 1-2. Di seguito si riportano le caratteristiche termiche dell'acciaio, strutturale e d'armatura, e del calcestruzzo, in maniera sintetica rimandando, per maggiori chiarimenti, alle norme stesse.

L'Eurocodice 4 parte 1-2, fornisce, nella sezione 3.3, i valori delle principali proprietà termiche dei materiali al variare della temperatura, come il coefficiente di dilatazione termica, il calore specifico e la conducibilità, nonché, i parametri di trasmissione del calore, da utilizzare per l'analisi del transitorio termico e la conseguente valutazione del campo delle temperature. Il calore specifico è la quantità di calore che deve essere fornita all'unità di massa per innalzare di un grado la sua temperatura. La conducibilità termica è un parametro che serve a definire il flusso termico all'interno di un corpo.

Nelle figure che seguono sono riportati gli andamenti delle grandezze sopra elencate in funzione del tempo per l'acciaio.



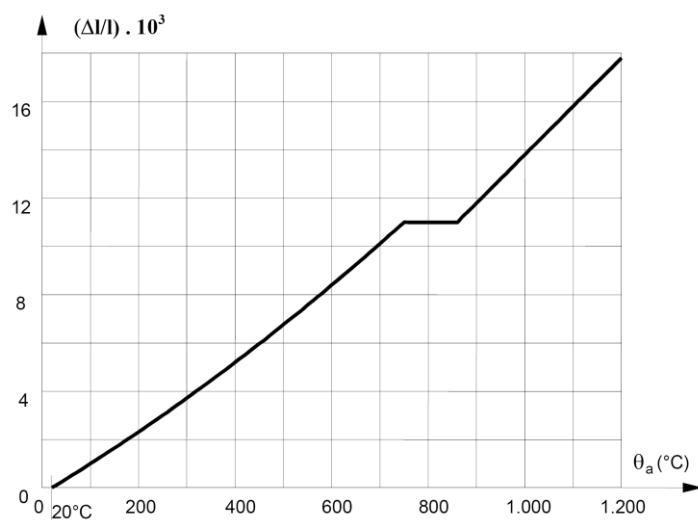


Figura 3-7 - Variazione della dilatazione termica  $(\Delta l/l)$  dell'acciaio in funzione della temperatura

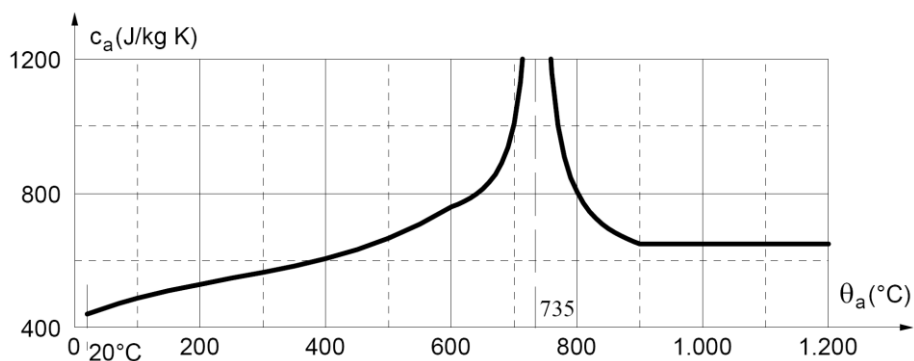


Figura 3-8 - Variazione del calore specifico dell'acciaio in funzione della temperatura

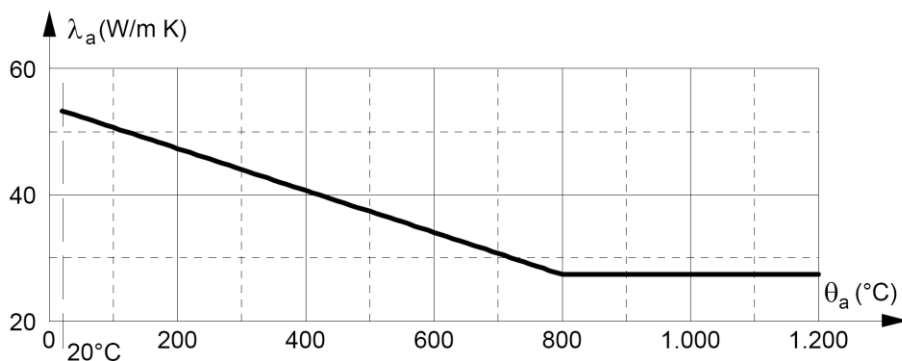


Figura 3-9 Variazione della conducibilità termica dell'acciaio in funzione della temperatura

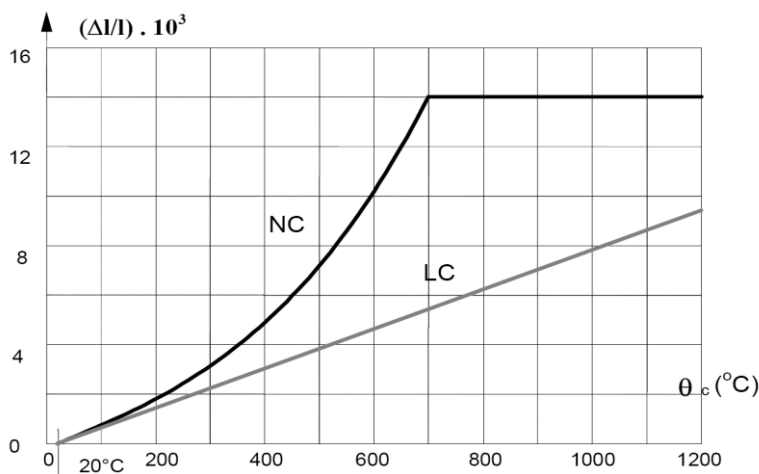


Figura 3-10 Variazione della dilatazione termica per calcestruzzo normale (NC) e per calcestruzzo alleggerito (LC) in funzione della temperatura

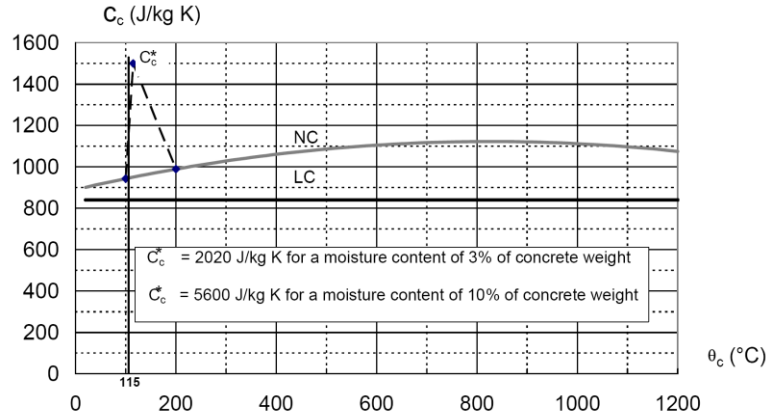


Figura 3-11 Variazione del calore specifico per calcestruzzo normale (NC) e per calcestruzzo alleggerito (LC) in funzione della temperatura

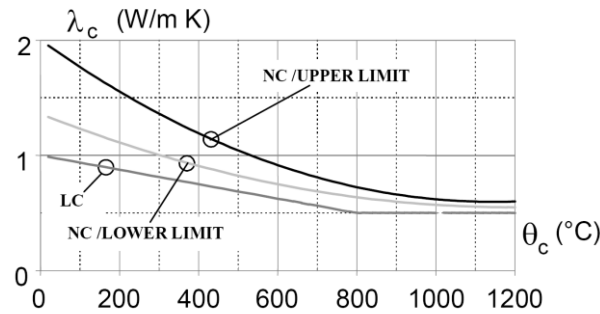


Figura 3-12 Variazione della conducibilità termica per calcestruzzo normale (NC) e per calcestruzzo alleggerito (LC) in funzione della temperatura

La densità dell'acciaio può essere ritenuta indipendente dalla temperatura e pari a  $\rho_a=7850 \text{ kg/m}^3$ . Mentre la densità del calcestruzzo, a causa dell'aumento di temperatura subisce la perdita della parte del peso dovuta alle moli di acqua presenti nella sua composizione chimica, e pertanto risulta utile la seguente formulazione:  $\rho_c=2354-23,47 \cdot (T_c/100)$ .

### 3.7.2 Proprietà meccaniche dei materiali

Per la valutazione della capacità portante delle sezioni si fa riferimento ai legami costitutivi dei materiali (acciaio e calcestruzzo), definiti dalle norme al variare della temperatura. Nell'Eurocodice 4, parte 1-2, vengono definiti i valori di progetto sia delle proprietà meccaniche sia di quelle termiche. I coefficienti parziali di sicurezza da applicare alle resistenze dei materiali in presenza di fuoco vengono posti pari a  $\gamma_m=1.0$ , per l'acciaio da carpenteria metallica; per le armature e per il calcestruzzo. Nel paragrafo 2.3 (design value of material properties), infatti, i valori di progetto delle proprietà meccaniche (resistenza e deformazioni) sono definiti come segue:

$$X_{fi,d} = K_{\theta} \cdot X_K / \gamma_{M,fi} \quad (3-4)$$

dove:

- $X_K$  è il valore caratteristico della proprietà di resistenza o di deformazione a temperatura normale;
- $K_{\theta}$  è il fattore di riduzione per la proprietà di resistenza o di deformazione dipendente dalla temperatura del materiale (tale fattore verrà definito in seguito);
- $\gamma_{M,fi}$  è il coefficiente parziale di sicurezza per il materiale in esame, in condizioni di incendio, che la normativa consiglia di porre uguale a 1.

Invece, i valori di progetto delle proprietà termiche  $X_{fi,d}$  sono definiti come segue:

- $X_{fi,d} = X_{K,\theta} / \gamma_{M,fi}$  se un aumento della proprietà è favorevole alla sicurezza;

- $X_{fi,d} = X_{K,\theta} \cdot \gamma_{M,fi}$  se un aumento della proprietà è non favorevole alla sicurezza.

dove:

- $X_{K,\theta}$  valore della proprietà del materiale in condizioni di incendio, generalmente dipendente dalla temperatura;
- $\gamma_{M,fi}$  è il coefficiente parziale di sicurezza per il materiale in esame, in condizioni di incendio.

Bisogna, inoltre, notare, che non si considera il coefficiente riduttivo 0.85 della resistenza a compressione del calcestruzzo, in quanto il carico termico viene considerato un'azione di breve durata. Tutto ciò comporta che nel calcolo della capacità portante delle sezioni si utilizzano di fatto i valori caratteristici delle resistenze, il che provoca discontinuità di comportamento nel passaggio dalle condizioni normali di temperatura alle condizioni “a caldo”. Nelle figure che seguono si riportano gli andamenti nel tempo dei legami tensione-deformazione dell'acciaio e del calcestruzzo.

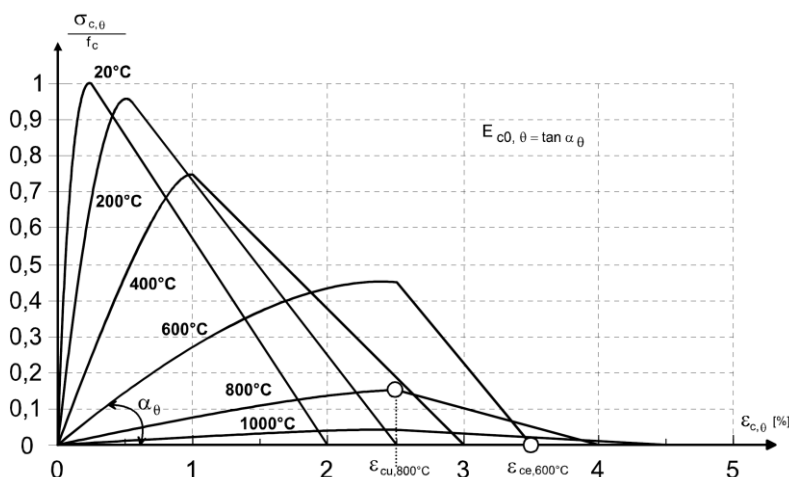


Figura 3-13 - Rappresentazione grafica del legame tensione-deformazione per calcestruzzi silicei con ramo linearmente decrescente

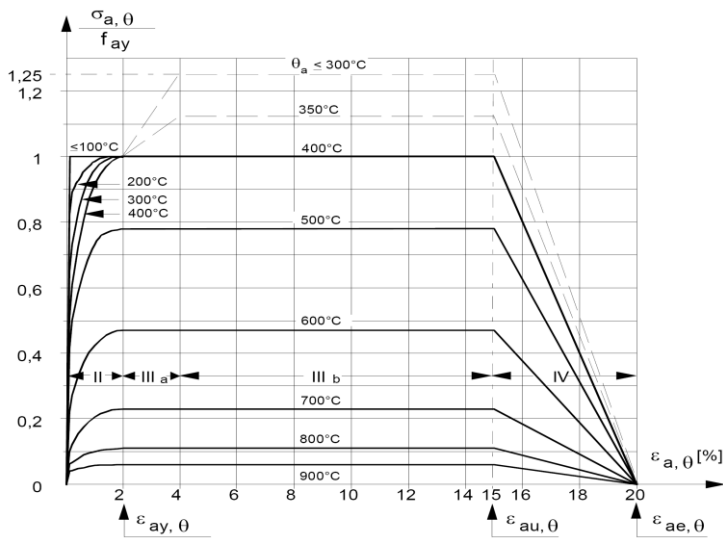


Figura 3-14 – Legame costitutivo dell'acciaio strutturale in dipendenza della temperatura

Nel legame tensione-deformazione dell'acciaio strutturale si può notare che per valori della temperatura inferiori a 400°C la norma prevede anche la presenza dell'incrudimento, a patto che l'instabilità locale sia evitata e che il rapporto tra la resistenza caratteristica a trazione dell'acciaio strutturale e la resistenza in condizioni di snervamento sia limitata a 1.25. L'effetto dell'incrudimento dovrebbe essere tenuto in conto solo per analisi basate su modelli di calcolo avanzati e se è provato che le rotture locali (schiacciamento, rottura per taglio, ecc) non sopraggiungono a causa dell'incremento di deformazione.

Il legame tensione-deformazione del calcestruzzo è stato ricavato per calcestruzzi silicei, nel caso di calcestruzzi calcarei si possono usare gli stessi parametri perché normalmente sono a vantaggio di sicurezza.

Nell'Eurocodice 4 parte 1-2, vengono, inoltre, riportati i diagrammi che forniscono la variazione dei fattori di riduzione della resistenza e della rigidezza, sia per l'acciaio (Figura 3-16) che per il calcestruzzo (Figura 3-15), in funzione della temperatura.

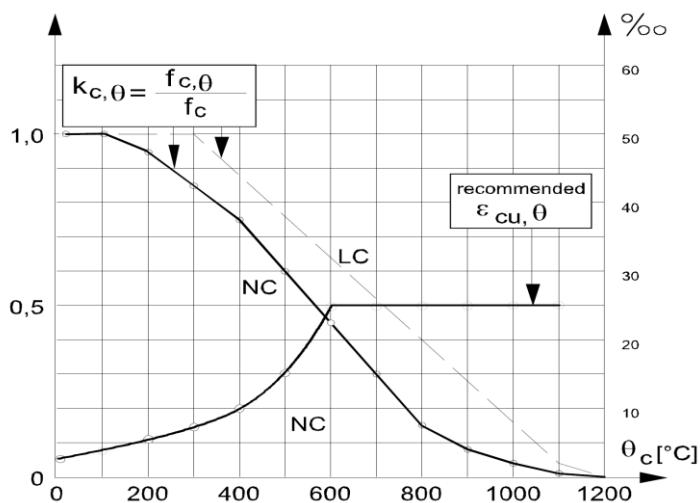


Figura 3-15 Fattori di riduzione della resistenza e della rigidezza per il calcestruzzo normale (NC) e alleggerito (LC)

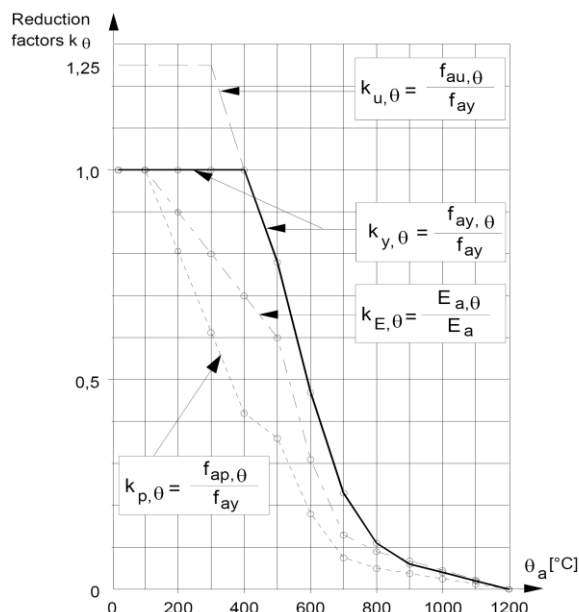


Figura 3-16 - Fattori di riduzione della resistenza e della rigidezza per l'acciaio strutturale

Il calcestruzzo nell'Eurocodice 2 parte 1-1 è definito con due legami costitutivi differenti:

- un legame continuo con tratto discendente, da utilizzare in analisi in cui sono necessarie valutazioni accurate delle deformazioni, come nei problemi di instabilità;
- un legame semplificato parabola-rettangolo, utile ai fini del calcolo delle capacità di resistenza delle sezioni.

Il legame tensione-deformazione definito nell'Eurocodice 4, per una temperatura di 20°C, si differenzia da entrambi, essendo costituito da un ramo di parabola fino ad una deformazione dello 0.25% e da una retta per deformazioni maggiori. Ovviamente, al crescere della temperatura il legame si modifica ottenendosi valori di resistenza via via più ridotti e deformazioni più grandi.

Analogamente, sempre nell'EC4, il legame tensione-deformazione dell'acciaio è definito da un tratto elastico fino al limite di proporzionalità, da un tratto ellittico fino alla resistenza massima (che si ha per una deformazione del 2%), da un tratto orizzontale fino alla deformazione del 15% e da una retta che arriva alla resistenza nulla per una deformazione del 20%.

Bisogna notare che queste relazioni tensione-deformazioni sono state ottenute in riferimento all'incendio standard, ma possono essere usate, come una buona approssimazione, anche in riferimento all'incendio naturale; nella UNI-CNR (28-12-1999), invece, si afferma che per gradienti di riscaldamento al di fuori del campo dell'incendio standard la validità di tale legame deve essere dimostrata in modo esplicito.

Dall'esame dei diagrammi riportati, si osserva, anzitutto, che le deformazioni massime dei materiali non corrispondono ai limiti convenzionali (0,2 % e 0,35% per il calcestruzzo, 1% per l'acciaio) generalmente utilizzati per la valutazione della resistenza delle sezioni, ma risultano sensibilmente più grandi. Inoltre i legami costitutivi di entrambi i materiali presentano, a causa della temperatura, un notevole incremento della deformabilità; questa circostanza può essere molto importante nei problemi di instabilità, nei quali la deformabilità delle membrane gioca un ruolo determinante sull'entità degli effetti del II ordine.

## **4 Analisi termo-meccanica delle strutture in condizioni di incendio**

### **4.1 Modelli termo-fluidodinamici utilizzati**

Per poter implementare modelli di incendio, di complessità eterogenea (Ozone, CFAST, FDS) si rende necessario:

- definire la geometria del problema, dimensioni in pianta ed in altezza ed estensione e quantità di aperture;
- definire l'RHR nel compartimento;
- definire le caratteristiche di conducibilità termica dei materiali che compartimentano l'ambiente.

Il programma FDS necessita di maggiori parametri di input, tra gli altri:

- l'esatta posizione ed altezza dei carichi di incendio;
- le caratteristiche di prestazione termica dei materiali;
- le dimensioni delle celle degli elementi finiti;
- la velocità del vento in ingresso alle aperture modellate.

L'obiettivo di conoscere le temperature massime 'viste' dagli elementi strutturali ed il loro andamento nel tempo, consente di studiare differenti configurazioni



della geometria del problema, come l'incidenza delle aperture, la posizione dell'incendio, e l'occupazione in pianta dei materiali.

Occorre chiarire che i limiti imposti dai modelli a zona non consentono di poter studiare alcune configurazioni, come invece è possibile fare con un programma CFD. In particolare la configurazione 3 è stata implementata considerando la rottura dei vetri, supposti chiusi, durante l'incendio. Tale condizione di rottura risulta un fenomeno di difficile modellazione, poichè dovuta sia a fattori meccanici, come la dilatazione non uniforme del materiale, sia a fattori termici, poichè il singolo elemento è sottoposto ad alti gradienti di temperatura.

Generalmente una differenza di temperatura di circa 70 °C tra superficie esterna ed interna del vetro può già causarne la rottura, pertanto con FDS sono stati inseriti dei sensori (chiamati "DEVICE") in prossimità delle finestre, i quali a 120 °C circa attivano le aperture (chiamate "HOLE" nel compilatore FDS (7)). Questa scelta è motivata dalla considerazione che nel periodo iniziale è presente una fase di transitorio termico, durante il quale avviene un repentino aumento delle temperature (pre-flashover). Tale transitorio non permette alla superficie esterna di raggiungere le temperature della superficie interna, se non in un certo intervallo di tempo  $\Delta t$  (8).

In Tabella 4-1 è presente un quadro sinottico delle configurazioni implementate per alcuni scenari. Con i modelli a zona non risulta possibile simulare l'apertura delle finestre al raggiungimento di una assegnata temperatura.

*Tabella 4-1- configurazioni delle aperture implementate per uno degli scenari*

	CFAST/Ozone	FDS
configurazione 1: portone e finestre laterali aperte	✓	✓
configurazione 2: portone chiuso e finestre laterali aperte	✓	✓
configurazione 3: portone chiuso e finestre laterali attivate per $T > 120^{\circ}\text{C}$	-	✓

Le curve di temperatura applicate sulla struttura possono essere rappresentate da curve standard (ISO834), curve naturali di incendio derivanti da modelli parametrici, da modelli a zone o da modelli fluidodinamici avanzati.

Per descrivere il rischio di incendio negli edifici oggetto di studio, sono state implementate diverse curve di temperatura, studiandone gli effetti sulla struttura:

- ISO834 (6);
- curve derivanti da modelli a zona (9);
- curve derivanti da analisi fluidodinamiche avanzate (9).

Le attuali norme tecniche di sicurezza incendio (2) rappresentano una valida supporto per operare nella sicurezza incendio con approcci ingegneristici, in quanto, oltre agli altri aspetti già citati in 2.2.6, sono esplicitamente nominati programmi di calcolo ritenuti affidabili nella progettazione in condizioni di incendio, tra questi:

- CFAST (v. 7.1.1) che sostanzialmente compie analisi di modellazione incendio ad 1 o 2 zone, ed è curato dal NIST;
- Ozone (v. 2.2.6) (10), anch'esso consente di caratterizzare l'incendio con modelli a zona, sviluppato dall'Università di Liegi con la partecipazione di Arcelor Mittal;
- FDS (v. 6.3.2) (7) – il quale è un programma CFD 'single purpose', in quanto è stato sviluppato dal NIST con il fine specifico di caratterizzare il comportamento fluidodinamico in condizioni di incendio.

#### 4.1.1 Modellazione a zone: Ozone e CFAST

L'implementazione di modelli a zone è stata effettuata con l'insieme di dati usuali dell'ambiente e dell'incendio:

- inserimento dei dati geometria dell'hangar;
- immissione della curva RHR;
- definizione dei materiali di compartimentazione;
- definizione dei parametri dell'incendio.

Nella definizione dei parametri di incendio si sottolinea la scelta di utilizzare i valori del coefficiente di convezione suggeriti dagli Eurocodici di:

- $25 \text{ W m}^2/\text{K}$  con superficie "calda";

- $9 \text{ W m}^2/\text{K}$  con superficie “fredda”.

Entrambi i software utilizzati hanno la possibilità di ottenere le temperature sia da modello ad ‘una zona’, sia a ‘due zone’, sia di implementare una serie di criteri stabiliti (cfr. (11)) per il ‘passaggio’ da una zona a due zone durante la fase di calcolo.

Le grandi dimensioni dei locali e l’aereazione presente nella parte alta degli hangar fanno comprendere come la modellazione a due zone sia quella che garantisce, nello specifico, risultati attendibili.

CFAST nelle recenti versioni consente di rilevare temperature differenti all’interno del singolo compartimento, in funzione della distanza dai carichi di incendio.

Infatti è possibile dotare il modello di sensori (chiamati “target”) i quali, attraverso un modello di propagazione semplificato, tengono in conto fattori come l’irraggiamento e la convezione. Sono metodi di calcolo semplificati, sottoposti alle seguenti limitazioni di carattere operativo:

- la temperatura fornita non deriva da un’analisi fluidodinamica dell’ambiente in quanto il modello a zone non consente implicitamente di fornire gradienti termici ad esclusione delle 2 zone (upper layer e lower layer);
- non è possibile con la versione attuale del programma (CFAST ver. 7.1.1) far leggere ai target incendi localizzati in compartimenti differenti, seppure comunicanti.

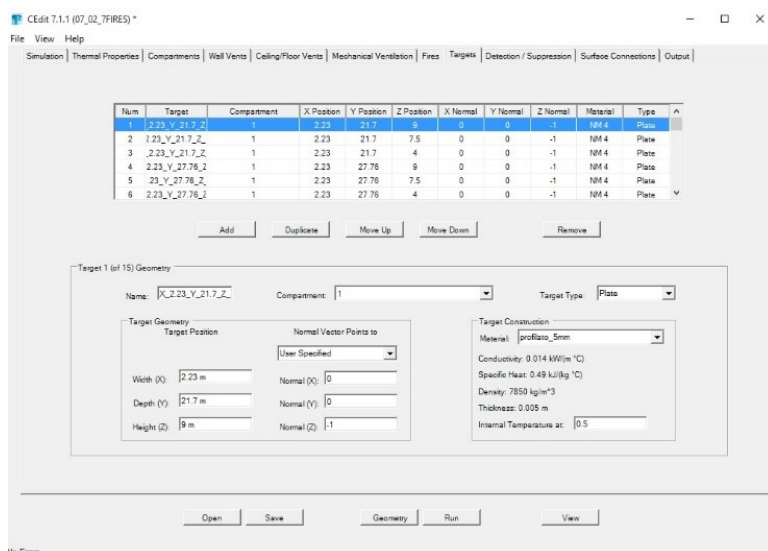


Figura 4-1 – Finestra di inserimento sensori termici (CFAST 7.1.1)

In tutte le analisi effettuate si è riscontrata una buona corrispondenza tra i due software, in termini di temperature, in particolare entrambi, sono in grado di operare il calcolo stabilendo, passo per passo, se l'incendio sia controllato dalla ventilazione o sia controllato dal combustibile.

Nei casi considerati l'incendio è controllato dal combustibile, sia a causa del basso carico specifico di volume (il più alto valore riscontrato è circa 32,5 MJ/mc), sia per la presenza di aperture molto estese (175 mq circa).

In Figura 4-2 è riportato un esempio di benchmark effettuato con i due software.

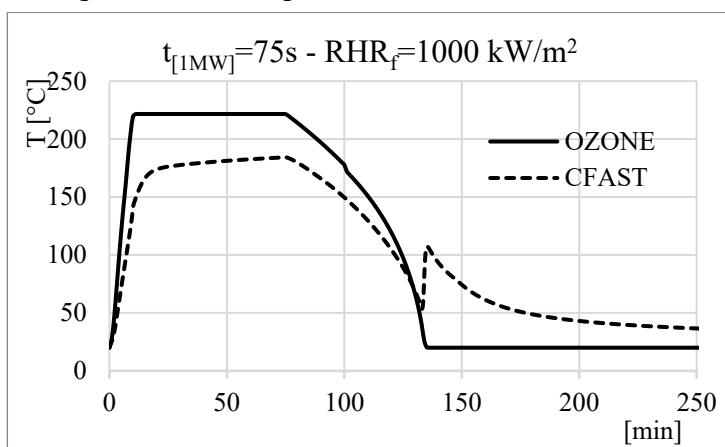


Figura 4-2 – Esempio di benchmark Ozone-CFAST

## **1. Modello Fluidodinamico con FDS: Parametri di input ed ipotesi di calcolo**

L'utilizzo di modelli avanzati CFD ai fini della progettazione della sicurezza incendio, rappresenta un valido supporto, soprattutto per approcci prestazionali, in quanto è possibile conoscere utili aspetti degli scenari, tra i quali:

- gradienti dei campi di temperatura all'interno di uno o più compartimenti, la cui conoscenza risulta molto utile nella Structural Fire Safety Engineering;
- calcolo della quantità di fuligine (soot) rilasciata a partire dalla composizione chimica dei materiali, utile per stabilire le soglie di altezza di visibilità ai fini del calcolo delle vie e dei tempi di esodo;
- implementazione di modelli di esodo basati su analogie di flussi o su modelli comportamentali;
- calcolo dei singoli contributi dovuti all'irraggiamento ed alla convezione, legato agli aspetti di propagazione dell'incendio;
- implementazione di modello unidimensionale di trasmissione del calore per conduzione (a geometria piana o cilindrica).

E' evidente che la conoscenza di tutti questi parametri è alimentata da un cospicuo set di dati di ingresso, i quali comprendono molti campi di sapere quali la chimica dei materiali, la termodinamica, ed adeguati modelli di pirolisi e di calcolo della componente radiativa del calore.

Visto l'elevato livello di conoscenza e approfondimento richiesto, sono stati implementati dei modelli al fine di raggiungere obiettivi validi e confrontabili, non avendo la pretesa di modellare il fenomeno incendio in tutti i suoi aspetti.

In questo lavoro il modello FDS è stato utilizzato per i seguenti scopi:

- confrontare i risultati con quelli derivanti dai modelli a zona;
- caratterizzare i gradienti di temperatura nel compartimento;
- modellare l'incendio con configurazioni non permesse dalla modellazione a zone, al fine di comprendere se a queste siano associati rischi di incendio maggiori (es apertura finestre ad una certa temperatura);

- ottenere i valori di temperatura in corrispondenza degli elementi strutturali, ovvero l'Adiabatic Surface Temperature (12).

Seppure nella piena consapevolezza che coesistano tanti aspetti della sicurezza incendio, in questo lavoro non sono stati approfonditi:

- i modelli di pirolisi dei materiali;
- la presenza di particelle di fumo all'interno del compartimento;
- il rapporto in alcune zone tra flusso radiativo e convettivo.

Le curve di rilascio termico (RHR) sono stati modellate come semplici bruciatori (chiamati 'burner' nel programma), i cui valori sono stati ricavati dai dati sperimentali e di letteratura presenti, come si vedrà nei casi analizzati.

Dati gli ambienti molto estesi in pianta ed in altezza la scelta della dimensione degli elementi finiti dei modelli ha rappresentato una sfida importante, considerato che dimensioni molto ridotte avrebbero comportato un onere computazionale supportabile solo con l'utilizzo di data-center adeguati.

D'altra parte dimensioni molto elevate degli elementi finiti avrebbero comportato una perdita di dettaglio nel modello, soprattutto in relazione al principale obiettivo di ottenere le temperature sugli elementi strutturali, colonne e capriate metalliche.

Sulla base di quanto esposto e dal confronto con altre modellazioni di ambiente simili (13), è stata scelta una dimensione degli elementi compresa tra gli 0,8 e gli 1,2 m.

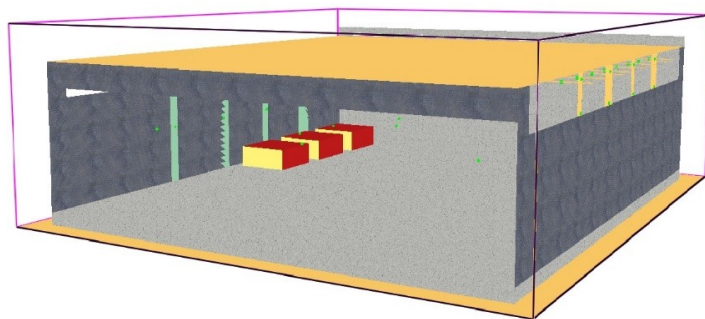
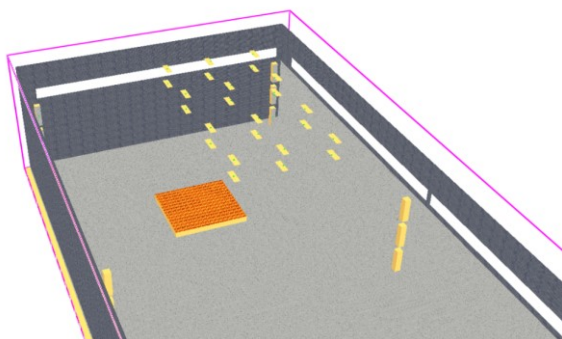


Figura 4-3 –Hangar magazzino modellato in FDS (smokeview)

Al fine di rilevare la temperatura AST nell'ambiente sono state modellate delle lamine in acciaio dello spessore variabile tra i 5 mm ed i 10 mm. Nonostante le dimensioni degli elementi finiti, è sempre possibile operare in questo modo, poiché FDS permette di definire delle superfici di materiali e calcolare la conduzione del calore all'interno di essi, seppur con modelli semplificati (7).

Smokeview 6.1.11 - Jul 16 2014



*Figura 4-4 – Hangar aviorimessa: esempio di sensori AST posti in corrispondenza delle capriate modellato in FDS (smokeview)*

## **4.2 Modellazione termo-meccanica con il codice di calcolo agli elementi finiti: SAFIR2016**

Ci sono molti software disponibili per la modellazione strutturale in caso di incendio. In questo paragrafo si fornisce una descrizione generale di SAFIR2016 sviluppato presso l'Università di Liege in Belgio (14) che il programma utilizzato per le analisi in condizioni di incendio in questo lavoro.

SAFIR2016 è un software per l'analisi strutturale in condizioni ambientali o ad elevate temperature. È stato sviluppato da Jean-Marc Franssen presso l'Università di Liegi in Belgio, come seconda generazione del codice di calcolo strutturale in caso di incendio CEFICOSS, sviluppato anch'esso a Liegi. Esso è basato sul metodo degli elementi finiti, è in grado di modellare le temperature e il comportamento strutturale di strutture mono, bi e tri-dimensionali, sottoposte ad incendi definiti dall'utente attraverso la discretizzazione della struttura e della sezione, nel dominio del tempo.

Le curve di incendio già implementate nel programma sono: ISO834, ASTM E119 e ULC S-101. È in grado di modellare elementi beam (trave), truss (pendolo) e shell (piastra). I legami costitutivi tensione-deformazione sono incorporati nella idealizzazione dell'elemento, nelle procedure di calcolo e in diversi modelli di materiale. Una relazione lineare è generalmente adottata per definire il legame costitutivo tensione-deformazione dell'acciaio mentre una relazione non lineare è adottata per il calcestruzzo.

Il programma esegue due analisi disaccoppiate:

- analisi termica nel tempo degli elementi strutturali;
- analisi strutturale nel tempo che tiene conto passo per passo di:
  - sollecitazioni e deformazioni meccaniche dovute ai carichi applicati nel tempo;
  - sollecitazioni e deformazioni termiche calcolate sulla base dell'analisi termica precedentemente effettuata;
  - degrado meccanico dei materiali in conseguenza dell'analisi termica in termini di resistenza, rigidità e deformabilità.

Le analisi strutturali consistono nel definire il seguente sistema matriciale di equazioni per risolvere simultaneamente un gran numero di equazioni in modo da raggiungere la soluzione corretta:

$$\{F\} = [K]\{U\} \quad 4-i$$

dove:

- F vettore dei carichi generalizzati o delle forze nella struttura;
- K matrice di rigidità;
- U è il vettore degli spostamenti generalizzati della struttura.

Il programma prevede due step fondamentali nell'analisi delle strutture soggette ad elevate temperature: l'analisi termica e l'analisi strutturale o meccanica.

Nel file di input sono contenute le informazioni relative ai parametri della sezione o della struttura, a seconda che sia relativo ad un'analisi termica o ad un'analisi strutturale, come ad esempio le coordinate dei nodi, il tipo di elementi finiti da



utilizzare e le proprietà dei materiali, i flussi termici (nelle analisi termiche) e i carichi (nelle analisi strutturali). In Figura 4-5 è mostrata la rappresentazione schematica delle fasi e dei file da definire nell'analisi di un telaio costituito da travi e pilastri.

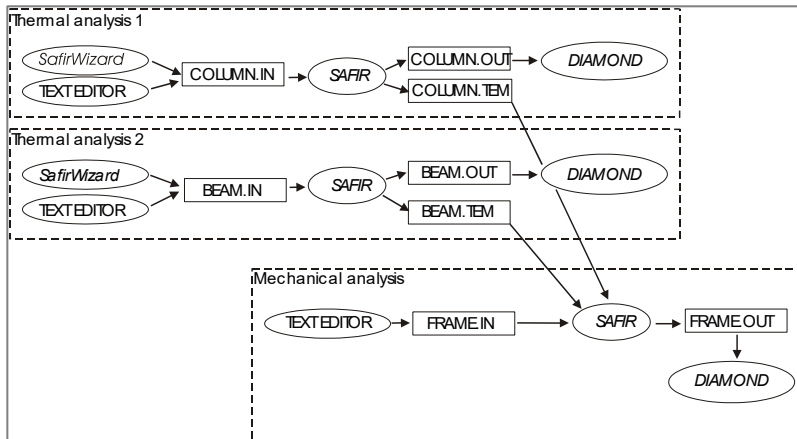


Figura 4-5 – Processo operativo del programma di analisi

I risultati sia dell'analisi termica sia di quella strutturale vengono restituiti in file testuali e possono essere visionati in forma grafica utilizzando il post-processore chiamato Diamond.

Alcune caratteristiche di calcolo sono comuni a tutte le analisi condotte con SAFIR:

- la rinumerazione interna del sistema di equazioni effettuata dal programma, in modo trasparente all'utente, allo scopo di ottimizzare la larghezza di banda della matrice e ridurre la memoria utilizzata e i tempi di calcolo;
- l'imposizione della stessa temperatura o dello stesso spostamento a due nodi differenti può essere fatta utilizzando relazioni master-slave;
- le proprietà meccaniche dell'acciaio e del calcestruzzo in accordo con l'Eurocodice 2, 3 e 4 sono implementate nel codice di calcolo e possono essere utilizzate direttamente.

## 5 Hangar Metallico ad uso Magazzino

### 5.1 Descrizione generale

La prima applicazione svolta nell'ambito della presente Tesi di dottorato si riferisce ad hangar metallici ad uso magazzino di stoccaggio, che costituiscono una costruzione tipica e di grande interesse per l'Aeronautica Militare.

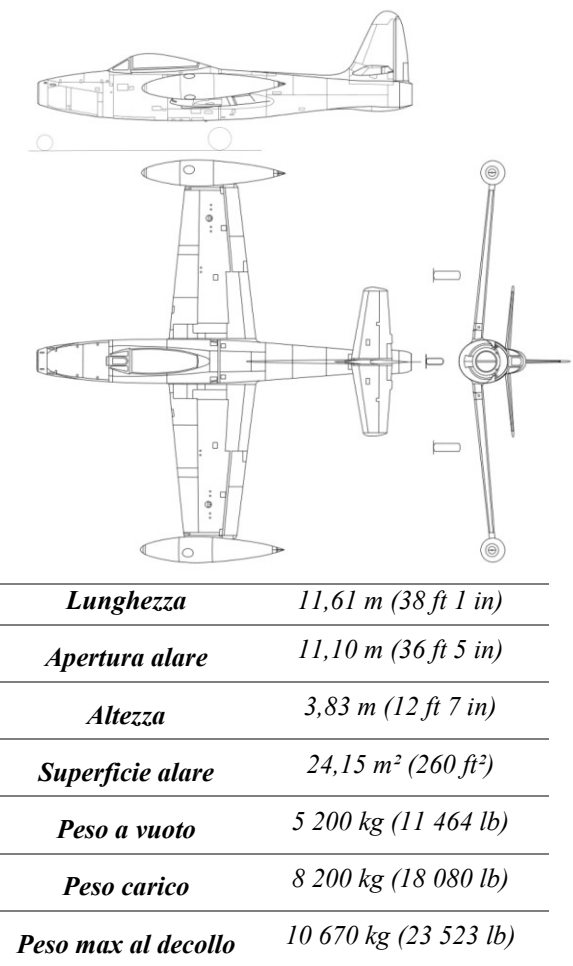
La struttura oggetto di studio è un'Aviorimessa sita in Zona Operativa, all'interno dell'Aeroporto Militare di Villafranca di Verona (VR).



*Figura 5-1 : Vista satellitare*

L'hangar nasce nel 1957 con funzione primaria di aviorimessa per velivoli da caccia e ricognitori F-84G Thunderjet con motori a getto (Figura 5-2). Le

dimensioni della struttura sono di 33 m x 36,50 m con altezza variabile dagli 8 ai 12 m. Nel tempo esso ha subito diversi interventi e variazioni di destinazioni d'uso. Dal 2008 ha assunto la moderna configurazione di Hangar di stoccaggio merci destinate al trasporto per operazioni internazionali.



*Figura 5-2 - Dimensioni di ingombro del velivolo F84 Thunderjet, movimentato nell'hangar nella precedente destinazione d'uso (15)*

## **5.2 Attività di rilievo delle caratteristiche del fabbricato**

Il rilievo dello stato di fatto ha avuto l'obiettivo di conoscere gli scenari di incendio che si possono verificare nel magazzino ed il comportamento degli elementi resistenti della struttura.

Le informazioni riguardo la geometria strutturale e le tipologie di carichi presenti sono state acquisite attraverso un'analisi documentale. Ad integrazione e verifica delle informazioni documentali è stata affiancata una rilevazione diretta.

I documenti analizzati hanno fornito utili informazioni riguardo la natura dei lavori di manutenzione effettuati e la geometria iniziale della struttura, non interessata dagli interventi postumi. Lo storico degli interventi consiste nella descrizione dettagliata di questi corredato dal costo economico di ciascun lavoro. Le rilevazioni dirette, ad eccezione di alcuni dettagli, hanno confermato quanto contenuto nel cartaceo.

Il magazzino di stoccaggio è a servizio diretto delle attività di trasporto dei velivoli operanti nell'aeroporto, pertanto viene effettuata la registrazione in ingresso ed uscita della tipologia di merci e delle relative quantità, vista la presenza di limiti di peso data dalle specifiche di ognuno dei velivoli utilizzati.

I libri di 'carico/scarico' merci con indicate le tipologie e le quantità stoccate in magazzino hanno consentito di valutare correttamente gli scenari di incendio, soprattutto le modalità di stoccaggio nel compartimento dell'hangar, le cui modalità di uso sono regolamentate da norme militari di settore che distinguono i materiali in base alla natura ed al livello di rischio (16).

### **5.2.1 Struttura originale**

Il progetto originale dell'Hangar risale al 1957. La pianta ha uno sviluppo di 33 m x 36,50 m. Tali dimensioni sono state inizialmente concepite per garantire adeguati margini di manovra ai velivoli. Con il cambio di destinazione d'uso da

avviorimessa in magazzino di stoccaggio, tali altezze risultano molto maggiori rispetto a quelle strettamente necessarie allo stoccaggio.

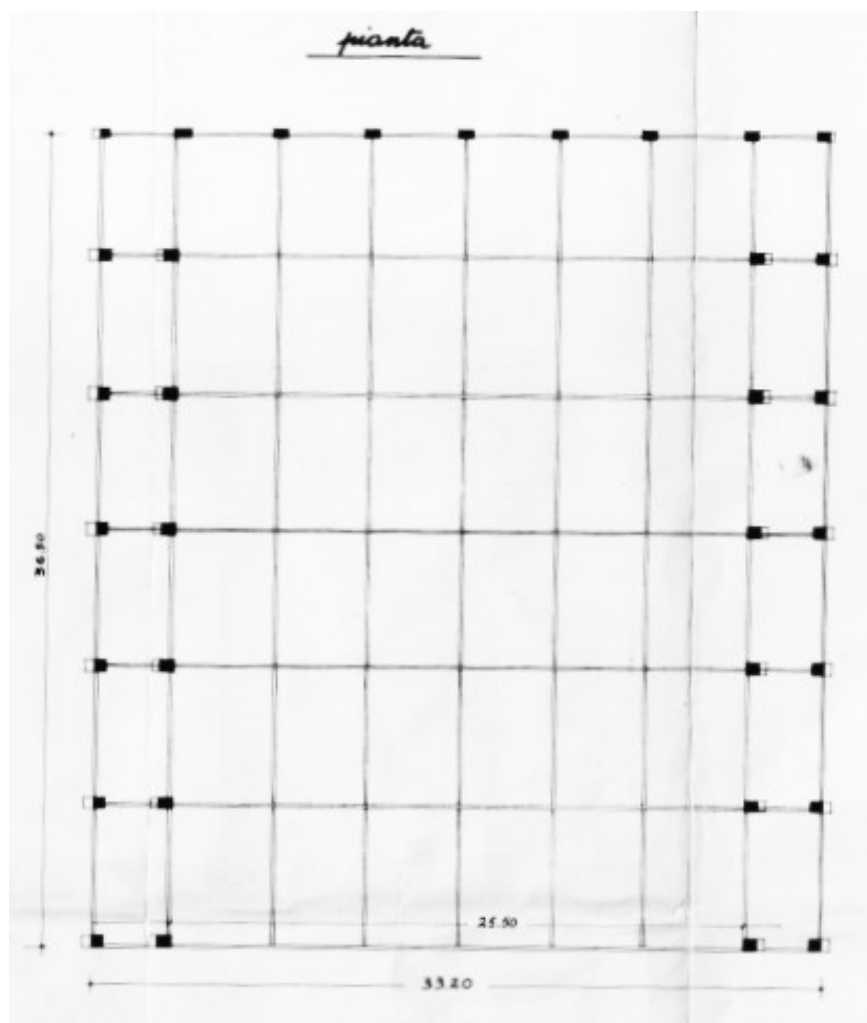


Figura 5-3 - Pianta del progetto originale (stralcio)

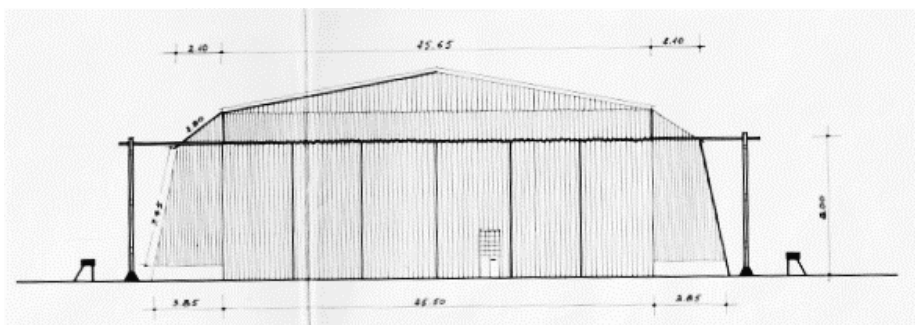


Figura 5-4 - Vista frontale anteriore (stralcio)

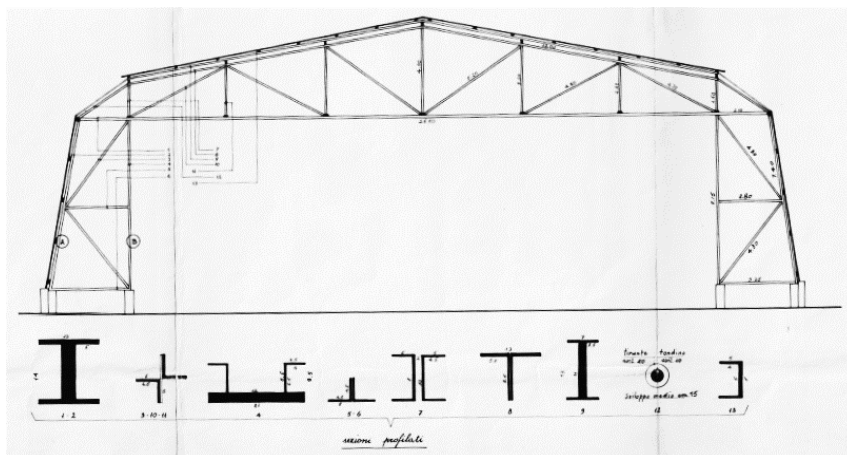


Figura 5-5 Sezione trasversale (stralcio)

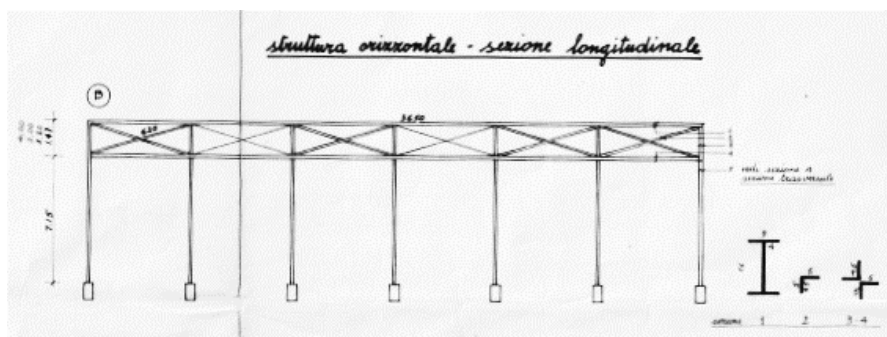


Figura 5-6 - Sezione longitudinale (stralcio)

Le fondazioni sono composte da plinti in calcestruzzo armato, non è specificato se essi siano isolati o collegati da travi fondali, lo strato di sottofondazione risulta da progetto formato da malta idrofuga ed asfalto. La copertura e le pareti laterali sono composte da lamiera grecata. Oltre all'apertura principale, formata da due portoni scorrevoli su carrelli di dimensioni 30 x 8,20 m, erano originariamente

previsti dei lucernari a nastro sulla parte superiore di entrambe le fiancate di dimensioni 36,50 x 1,73 m. La pavimentazione era formata da piastrelle in gres con sottofondo in sabbia/cemento.

## **5.2.2 Storico degli interventi strutturali**

Nei sessant'anni di utilizzo della struttura, è stata compiuta manutenzione ordinaria e straordinaria, soprattutto in virtù delle variazioni di destinazioni d'uso dovute al cambio di velivoli utilizzati, ovvero all'avanzamento tecnologico del sistema d'arma dell'Aeronautica Militare. L'attuale configurazione consiste nell'insediamento del '3° Stormo Supporto Operativo', con funzioni di supporto logistico per operazioni in contesti internazionali. A seguito della conversione dell'Aeroporto da Militare ad Aeroporto Civile dello Stato, il passaggio di velivoli militari è esclusivamente dovuto al trasporto merci e/o civili di supporto ad operazioni internazionali. Si riportano gli interventi ritenuti maggiormente significativi ovvero che hanno riguardato la struttura, escludendo altre tipologie di interventi a meno che non abbiano cambiato in modo sostanziale la configurazione in corso.

- Luglio 1965: costruzione dell'appendice in muratura e calcestruzzo armato adiacente l'hangar metallico ad uso uffici. Il corpo di fabbrica è indipendente dalla struttura principale, separato da essa mediante cordolo di cls armato con spessore 6 cm, e con mura perimetrali di spessore 12 cm in muratura di cotto pieno.

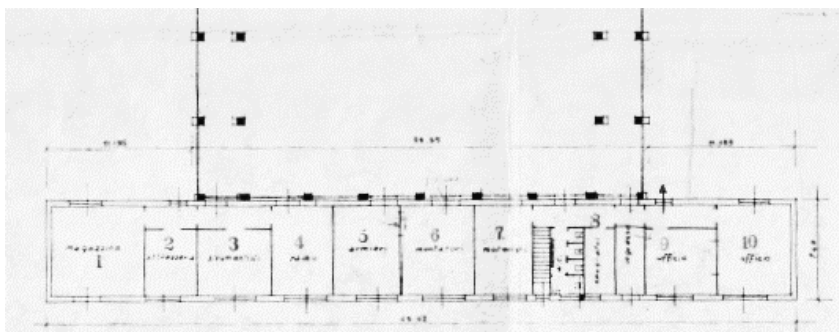


Figura 5-7 Appendice

- 1967: sostituzione delle lamiere di copertura e laterali. L'aspetto e i carichi della struttura non sono variati, vengono sostituiti i pannelli esistenti con lamiere in acciaio zincato.
- 1981: modifica dell'appendice. L'edificio adiacente viene prolungato in corrispondenza della parte laterale della struttura principale, e viene inoltre ridistribuito lo spazio interno con interventi architettonici.

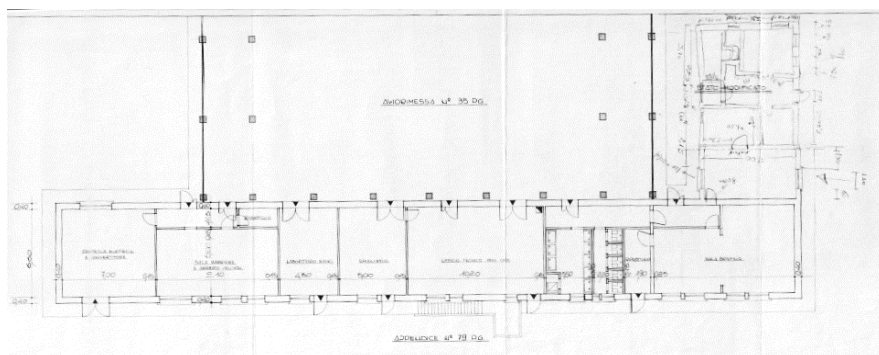


Figura 5-8 Architettonico dell'appendice

- 1982: opere di controsoffittatura e sostituzione dei portoni scorrevoli. Viene realizzato un controsoffitto di pannelli termoisolanti che nasconde gli impianti idrici e di ventilazione, con un rivestimento di resine epossidiche espanse. I portoni scorrevoli vengono inoltre sostituiti.

La controsoffittatura è stata rimossa da recenti lavori impiantistici di manutenzione straordinaria effettuati nel 2015.



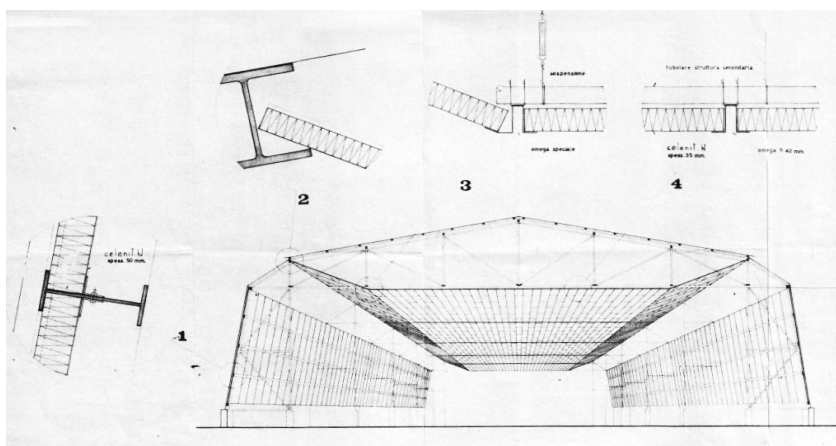


Figura 5-9 - Pannelli di controsoffittatura, rimossi nell'attuale configurazione

- 2008: rifacimento pavimentazione. Le piastrelle in gres sono sostituite con uno strato di 15 cm di calcestruzzo C 25/30 armato con barre di acciaio, no alterando il pacchetto sotto la fondazione. All'interfaccia tra i due materiali sono posti uno strato di tessuto non tessuto 200 gr/mq e un telo di nylon 200 gr/mq (Figura 5-10).

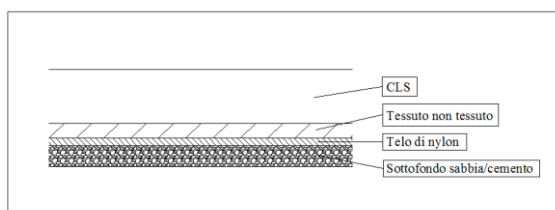


Figura 5-10 Pavimentazione dell'hangar magazzino

- 2009: Costruzione di impianti di sollevamento pallet. Assumendo definitivamente la configurazione di hangar con funzioni di stoccaggio materiale destinato al carico su velivoli militari, vengono costruite due piattaforme elevatrici oleodinamiche per pallets al fine di facilitare le operazioni di carico-scarico. Viene inoltre aggiunto uno strato di pavimentazione in resina.

### 5.2.3 Stato di fatto dell'edificio

Attualmente la configurazione strutturale dell'hangar è pressoché invariata rispetto al progetto originario. Nel Luglio 2016 è stata rimossa la controsoffittatura e sostituiti i pannelli laterali e di copertura con pannelli sandwich “zero klass wall” e “zero klass roof” con caratteristiche di reazione al fuoco “A2-s,d0” (conforme a quanto indicato nel Capitolo S.1 "Reazione al fuoco" del DM 03/08/2015) .

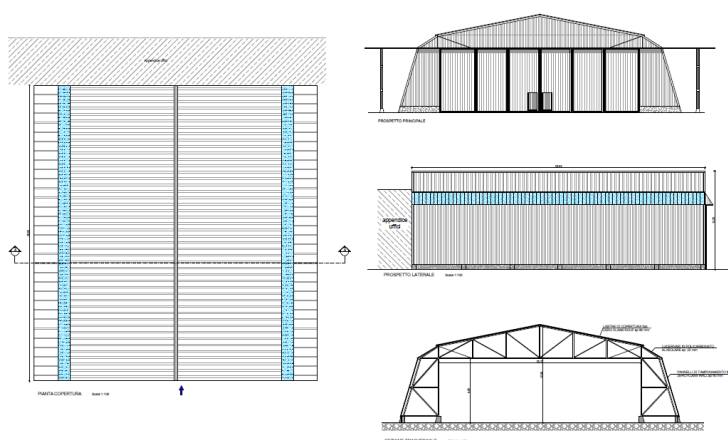


Figura 5-11 Copertura attuale

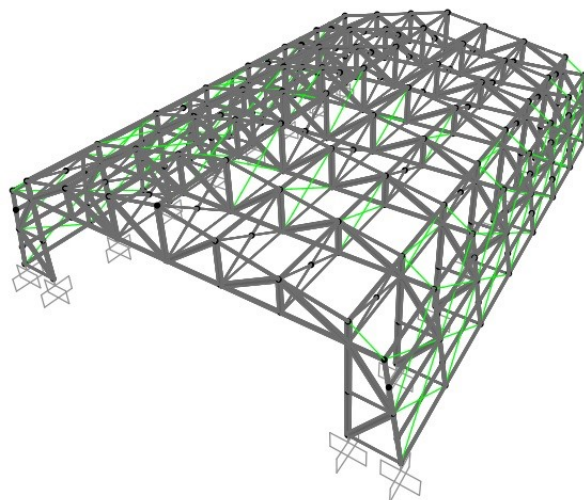
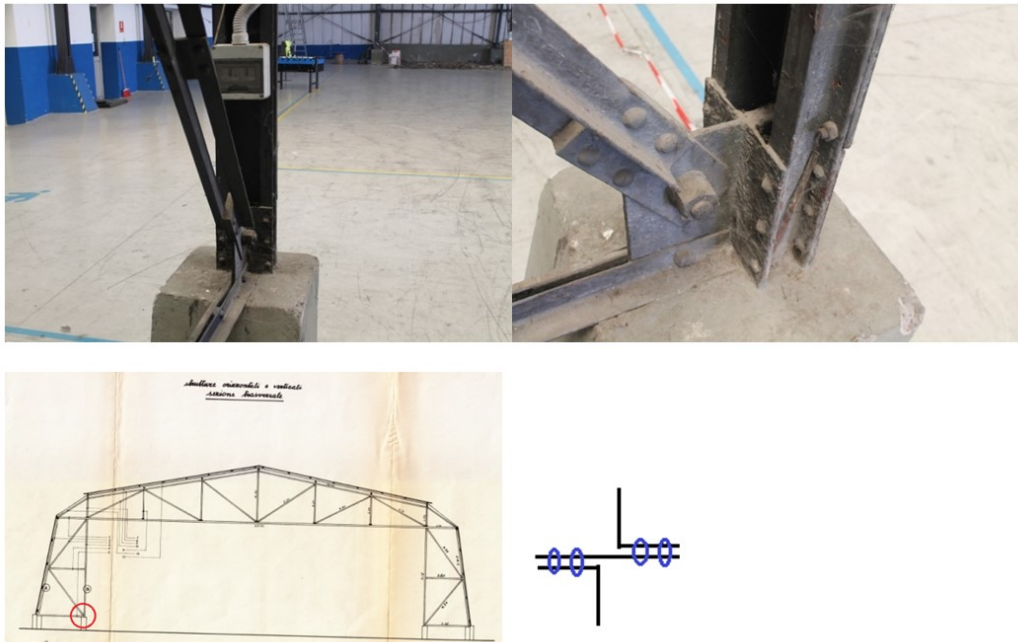


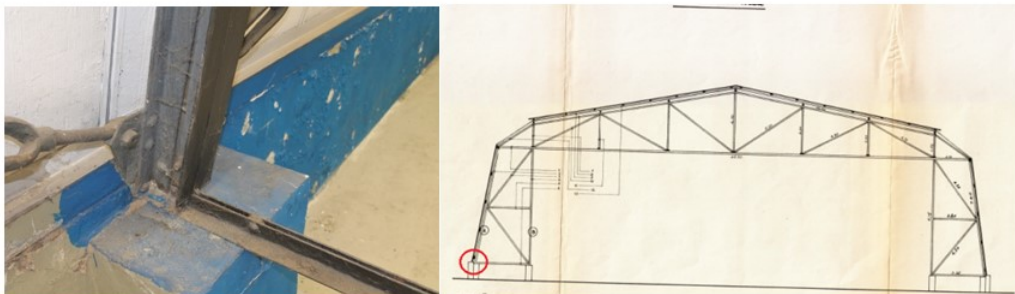
Figura 5-12 – Modello strutturale dell'hangar

### 5.2.3 Dettagli costruttivi

Di seguito il rilievo fotografico delle sezioni che compongono i telai interni, di cui si è verificata la corrispondenza con i disegni del 1957.



*Figura 5-13 -Elemento inferiore collegante i due appoggi*



*Figura 5-14 - Foto del nodo di appoggio*

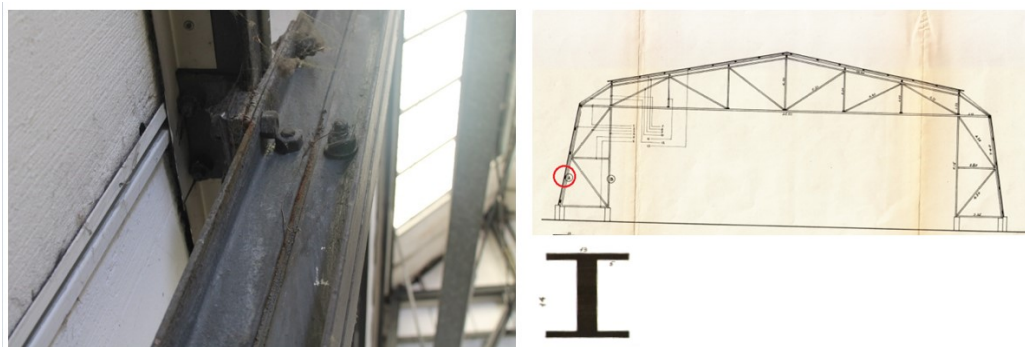


Figura 5-15 – Sezione “IPE” formata da piatti saldati

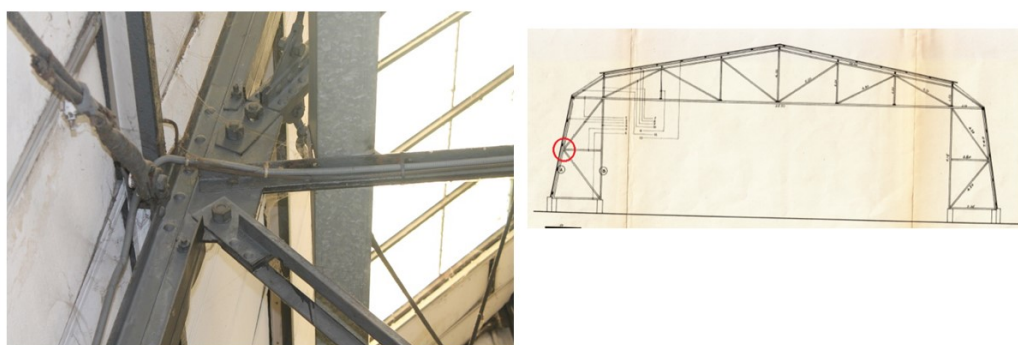


Figura 5-16 – Particolare di un nodo

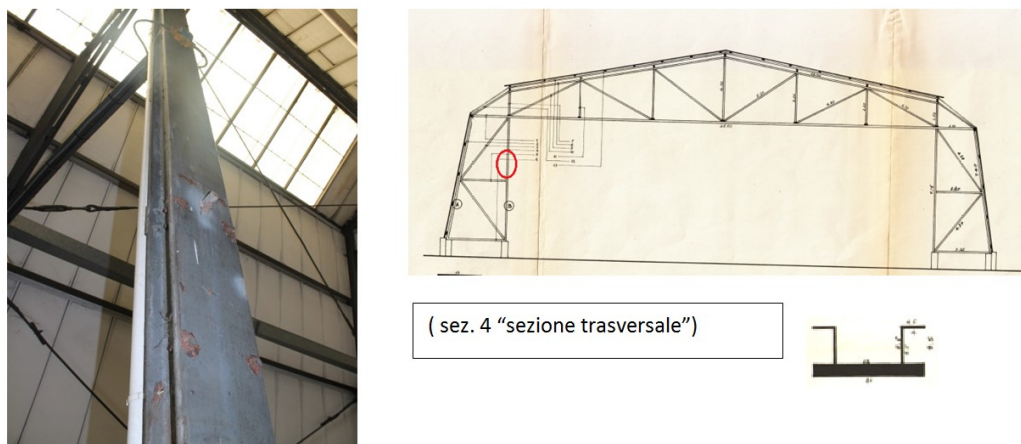
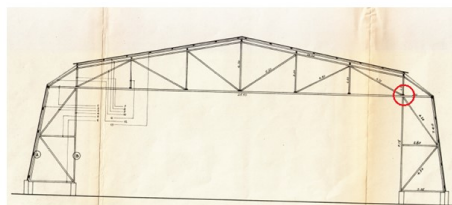
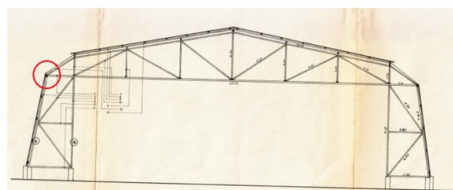


Figura 5-17- Sezione verticale con doppia C saldata ad una piastra



*Figura 5-18 - Nodo superiore**Figura 5-19 – Sezione piena in acciaio  $d=10\text{cm}$* *Figura 5-20 – Vista dell'intradosso di copertura*

### 5.2.3 Materiali

Nel corso della raccolta dati sono stati effettuati dei prelievi su elementi strutturali, con conseguenti indagini in laboratorio (17). Pertanto è noto il comportamento meccanico dell'acciaio impiegato.

L'acciaio rilevato ha un comportamento del tipo bilineare (elasto-plastico) con incrudimento, in riferimento al provino e alle NTC 2008, le caratteristiche dell'acciaio sono riportate in Tabella 5-1.

*Tabella 5-1 – caratteristiche dell'acciaio derivanti da prove in laboratorio (17)*

$f_y$ [MPa]	$f_t$ [MPa]	$\epsilon_t$ %
286,1	378,7	31,3

### **5.3 Rilievo dei carichi di incendio tramite dati sperimentali e metodi di letteratura**

Come descritto nella sezione precedente, la funzione dell'hangar oggetto di studio è quella di stoccare i materiali necessari alle missioni all'interno e all'esterno dei confini nazionali. La presenza del registro di carico/scarico merci ha consentito di valutare le quantità stoccate giorno per giorno su periodo piuttosto lungo (10 anni circa). La procedura di stoccaggio prevede che il carico del singolo aereo venga imballato su pallet o mediante speciali container, permanga in hangar circa una settimana antecedente la partenza del volo e sia registrato all'atto del carico specificando: tipologia, pericolosità e peso. Da una prima lettura è stato possibile rilevare una elevata variabilità delle quantità e delle tipologie di carico, di individuare un periodo, di 3 mesi circa, caratterizzato da una intensa attività operativa e di rilevare come il posizionamento in pianta delle tipologie di materiale non sia determinato 'a priori'. Questi aspetti non consentono di determinare univocamente lo scenario di incendio 'peggiore' oppure lo scenario caratterizzato da una probabilità di accadimento significativamente più elevata rispetto ad altre configurazioni.

Pertanto è necessario individuare gli scenari di incendio a più alto rischio, evidenziando alcuni aspetti:

- la presenza di elevata variabilità del carico di incendio poiché il materiale stoccato può consistere tanto in materiale ad uso quotidiano (vettovaglie, cibo o farmaci) quanto in materiale fortemente combustibile (gas e liquidi infiammabili, PVC o materiale per telecomunicazioni);
- i dati forniti dal database comprendono, comunque, un arco temporale molto vasto (dati raccolti giornalmente per circa dieci anni);
- la registrazione dei materiali è una fonte di informazione con alcuni limiti in quanto è operata al solo scopo di comprenderne la pericolosità per danni alla salute umana, esplosioni ed incendio, e di poter definire il quantitativo stoccato sul velivolo, al fine di non superarne il 'carico pagante' al decollo (per approfondimenti sul carico pagante si rimanda a test specifici di Aerodinamica dei Velivoli).

Dall'esame dell'intero database, si è scelto un periodo di tre mesi (Giugno-Agosto) dell'anno 2014 caratterizzato da un'attività più intensa di stoccaggio merci.

Per poter calcolare il carico di incendio all'interno del compartimento è necessario stabilire i valori di potere calorifico dei principali materiali presenti, in rapporto sia alla quantità totale, sia in base alla loro attitudine di reagire al fuoco.

I parametri ingegneristicamente utili per una corretta definizione delle cruve di rilascio sono rappresentati da:

- energia totale rilasciata;
- velocità di accrescimento dell'incendio;
- massimo valore di potenza termica rilasciata ('peak release').

Pertanto si è ricercato, ove fossero disponibili, dati sperimentali e di letteratura, in modo da caratterizzare secondo questi tre parametri le curve di rilascio termico (RHR – Rate of Heat Release) dei singoli carichi.

Sono state consultate le principali fonti di dati attendibili a riguardo:

- database contenuto in CLaRaF, software redatto e fornito dal Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco italiani, per il calcolo del carico di

incendio, peraltro principalmente basato su dati risalenti ad un insieme di ricerche condotte negli Stati Uniti nel 1978 (18);

- indicazioni contenute in testi di riferimento (19);
- campagne sperimentali sul materiale specifico come indicato in Tabella 5-2;

*Tabella 5-2 – Ricerca dei parametri di incendio delle sostanze presenti nel compartimento*

<b>Materiale</b>	<b>potere calorifico</b>	<b>u.m.</b>	<b>Fonte</b>
pallets	300	[MJ/n.]	(20)
elettrodomestici	6,079	[MJ/kg]	(21) (22)
materiali vari	22,5	[MJ/kg]	(23)
tlc (rame)	2,48	[MJ/kg]	(24)
tlc (pvc)	43,6	[MJ/kg]	(25)
coperte	21	[MJ/kg]	(26)
ricambi veicoli autoreparto	15,32	[MJ/kg]	(23)
gruppi elettrogeni	8116	[MJ/n]	(24)
batterie	3	[MJ/kg]	(24)
lubrificante	42,6	[MJ/kg]	(24)
cassa di legno	17	[MJ/kg]	(24)
razioni k	14	[MJ/kg]	(27)
tende campali	21	[MJ/kg]	(28)
condizionatori campali	3,18	[MJ/kg]	(29)
tendostrutture	21	[MJ/kg]	(28)
mezzi antincendio	20.000	[MJ/veicolo]	(30)
farmaci	2,83	[MJ/kg]	(26)
copertoni	30	[MJ/kg]	(26)
vestiario	21	[MJ/kg]	(31)
liquidi infiammabili	20,39	[MJ/kg]	(24)
veicoli	12.000	[MJ/veicolo]	(32)
cassetta attrezzi	15,32	[MJ/kg]	(23)



Materiale	potere calorifico	u.m.	Fonte
veicoli pesanti	20.000	[MJ/veicolo]	(30)

Utilizzando le informazioni dei registri di carico e scarico con quelle disponibili sui poteri calorifici delle sostanze stoccate è stato diagrammato l’andamento del carico specifico di incendio nel compartimento, al variare delle giornate, nel periodo temporale analizzato di 3 mesi (Figura 5-21).

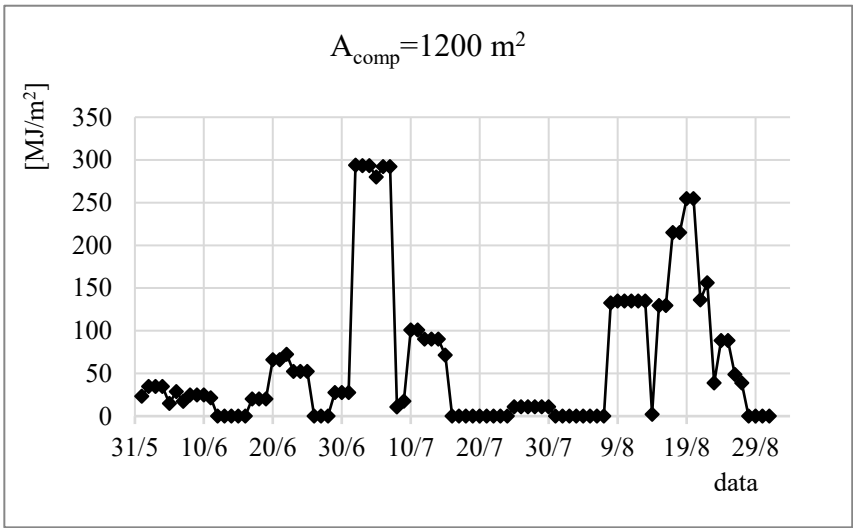


Figura 5-21 – Variazione del carico di incendio specifico nel compartimento per un periodo di 3 mesi

I giorni caratterizzati da valori di carico di incendio sostanzialmente nulli, sono dovuti all’assenza di materiale nel compartimento. In tali periodi l’hangar è in attesa di ricevere materiali in partenza (carico), o in arrivo (scarico).

I due ‘picchi’ principali di carico di incendio corrispondono a scenari di incendio distinti, in quanto caratterizzati da tipologie differenti di materiale.

Ai fini dell’individuazione degli scenari di incendio caratterizzati da più alto rischio, sono stati considerati entrambi, per le seguenti motivazioni:

- sono caratterizzati dai massimi valori di energia totale (carico di incendio totale);

- come risulta dai dati sperimentali, i differenti materiali posseggono sostanzialmente differenti curve RHR (Rate of Heat Release), con particolare riferimento ai parametri di velocità di crescita e di potenza massima (cd. ‘peak’ dell’RHR).

5.4 Definizione degli scenari di incendio

Gli **scenari di incendio** individuati sono stati denominati nel seguito ‘Scenario 1’ e ‘Scenario 2’. In Tabella 5-3 Tabella 5-4 sono riportati i dati del carico di incendio totale per gli scenari considerati ed i contributi dei singoli materiali.

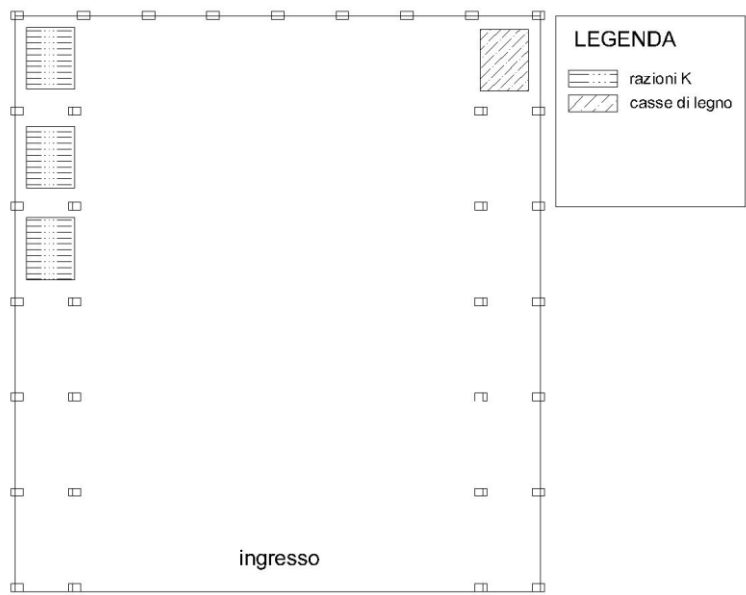


Figura 5-22 - Scenario 1 dimensioni compartimento 33m x 36m

In Tabella 5-3 i dati del carico di incendio totale per lo scenario considerato ed i contributi dei singoli materiali.

Tabella 5-3 – Carichi di incendio Scenario 1

Materiale	pot. cal		Quantità		Tot [MJ]	qi/qr
pallets	300	[MJ/n°]	62	[n°]	18.600	5.23 %

<b>casce di legno</b>	17	[MJ/kg]	700	[kg]	11.900	3.34 %
<b>razioni k</b>	14	[MJ/kg]	23.000	[kg]	322.000	90.63 %
					$q_f$ [MJ]	355.296
					$q_{f,s}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	294,0

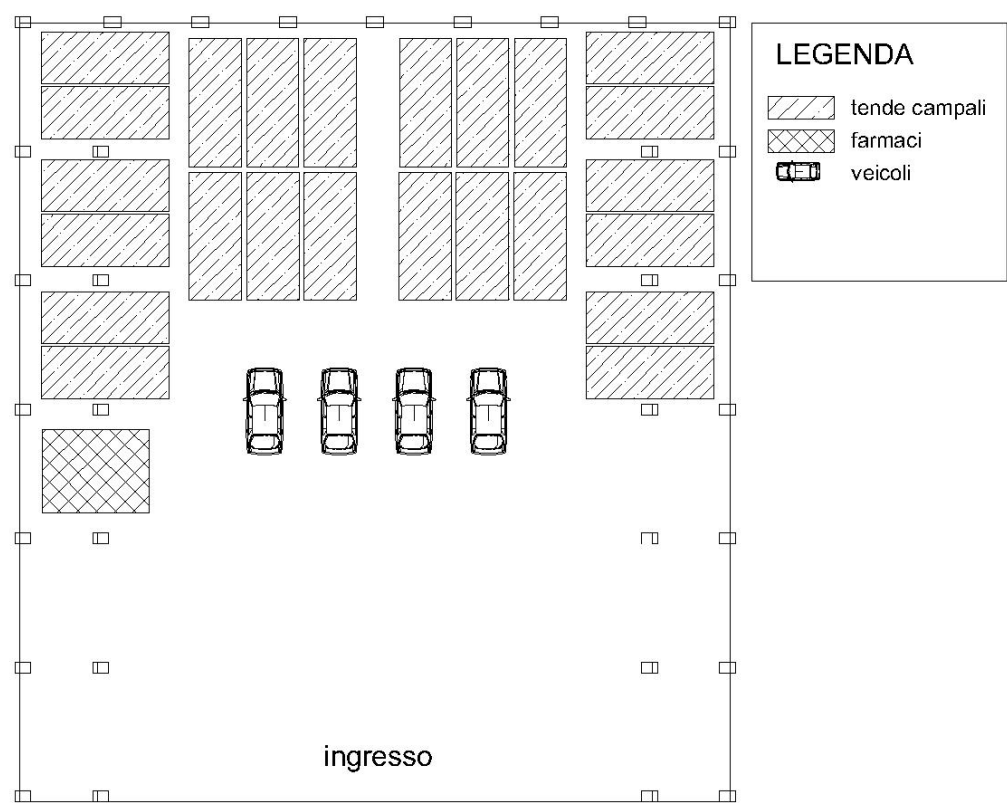


Figura 5-23 - Scenario 2 dimensioni compartimento 33m x 36m

Tabella 5-4 – Carichi di incendio Scenario 2

Materiale	pot. cal		Quantità		Tot [MJ]	qi/qf
<b>pallets</b>	300	[MJ/n°]	12	[n°]	3.600	1.2%
<b>tende campali</b>	21	[MJ/kg]	7.289	[kg]	153.069	49.8%
<b>farmaci</b>	2.83	[MJ/kg]	36.327	[kg]	102.806	33.4%
<b>veicoli</b>	12.000	[MJ/n°]	4	[n°]	48.000	15.6%
					$q_f$ [MJ]	307.475
					$q_{f,s}$ [MJ/m <sup>2</sup> ]	254,4

## 5.5 Caratteristiche delle curve naturali di incendio

Le principali caratteristiche che influiscono sulla definizione delle Curve di Rilascio Termico (RHR), e quindi delle curve di incendio, sono la quantità di materiale, in peso, che contribuisce all'incendio, la velocità di accrescimento dell'incendio, le modalità e le quantità con le quali è accatastato il materiale, la fonte di ignizione, e la quantità di ossigeno presente nell'aria.

Si può ricorrere a formulazioni semplificate, quali la 'curva  $t^2$ ', proposta negli Eurocodici e presente anche nel DM 03/08/2015 (tab M.2). Tale curva considera una fase di accrescimento, di raggiungimento di un plateau corrispondente alla massima potenza termica, ed una fase di raffreddamento lineare.

I parametri necessari a caratterizzare la curva  $t^2$  sono:

- il quantitativo totale di energia rilasciato;
- la velocità di incremento di potenza rappresentata dal tempo 't' in secondi impiegato per raggiungere la potenza di 1 MW ( $t_{[1MW]}$ );
- il valore di potenza massima di 'picco' corrispondente al plateau.

Su alcuni di questi parametri, sia l'Eurocodice sia le Nuove Norme Tecniche di Prevenzione Incendi, forniscono dei valori in funzione della destinazione d'uso del compartimento.

Le curve di rilascio termico, nel caso in esame, sono state ricavate da campagne sperimentali di misurazione del comportamento sotto incendio in condizioni controllate, come specificato di seguito.

## 5.6 Curve di rilascio termico dei singoli materiali (dati sperimentali e di letteratura)

### 5.6.1 Pallets

I pallets utilizzati in magazzino sono a servizio delle merci caricate, pertanto la loro configurazione dipende fortemente dal materiale caricato. Risulta comunque possibile conoscere il ‘peak value’ della curva RHR attraverso la formula proposta da Krasner (20) su unità di area in pianta:

$$\dot{q} = 919 \times (1 + 2,14 \times h_p) * (1 - 0,03 \times M) \left[ \frac{W}{m^2} \right] \quad 5-i$$

dove:

- $h_p$  è l'altezza della serie di pallets;
- $M$  è la percentuale di umidità nell'aria (*moisture*).

Si tenga presente che per valori di  $h_p$  inferiori a 0,50 m la formula tende a sovrastimare il valore di picco.

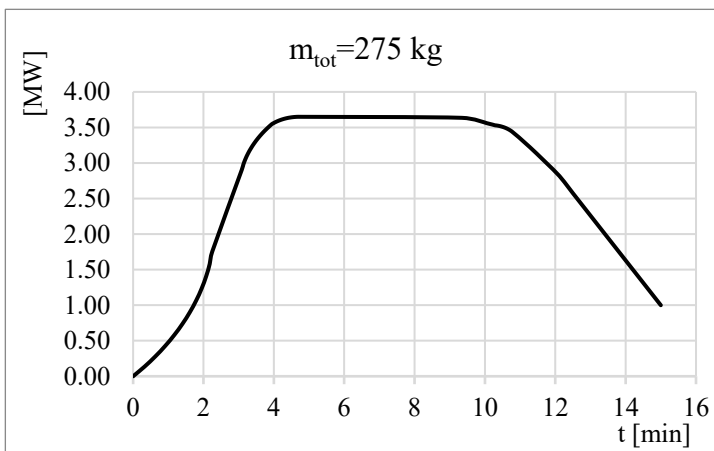


Figura 5-24 – RHR di pallets da test al calorimetrico

### 5.6.2 Tende campali

Sono state effettuate delle prove su varie tipologie di tende in differenti condizioni e di materiali unici e misti quali cotone, acrilico, poliestere, acetato, rayon e altri materiali sintetici in alcuni test (33) (34) (28). Le tende per utilizzo militare, a causa della tipologia di impiego, sono di materiale spesso, e, come risulta dalle specifiche tecniche dei fornitori di questa tipologia di tende, esse sono di cotone e poliestere con una grammatura della tela molto consistente e con lavorazioni di elettrosaldatura e di ricoprimento dei materiali plastici conformemente alla norma UNI 4817 (35).

Riferendoci ai dati delle tipologie in uso al Ministero della Difesa (35) e dei parametri forniti da Moore (34), per tende di grammatura di circa 330 g/m<sup>2</sup> sono stati utilizzati i seguenti parametri:

- tende di altezza 2,13m e larghezza 1,25m;
- peso di ciascuna tenda di 300 kg;
- valore di picco di ciascuna tenda di circa 330 kW;
- i valori del potere calorifico del cotone e del poliestere si attestano sui 21 [MJ/kg].

Dal rilievo della tipologia impiegata si è constatato che le tende stoccate nell'hangar sono più grandi e pesanti di quelle dei test sperimentali. Considerando che i test riferiscono di una bassa velocità di incendio rilevata e di una bassa partecipazione al fuoco del materiale, al fine di massimizzare il rischio correlato si è comunque considerato l'intero materiale come partecipante e sono stati incrementati i valori di picco in modo proporzionale al peso del materiale stoccato, questa indicazione segue alcune valutazioni su altri materiali fatta da Babrauskas in (19), per i quali si evince che il rapporto tra massa incendiata e valore di potenza termica di picco è lineare o meno che lineare.

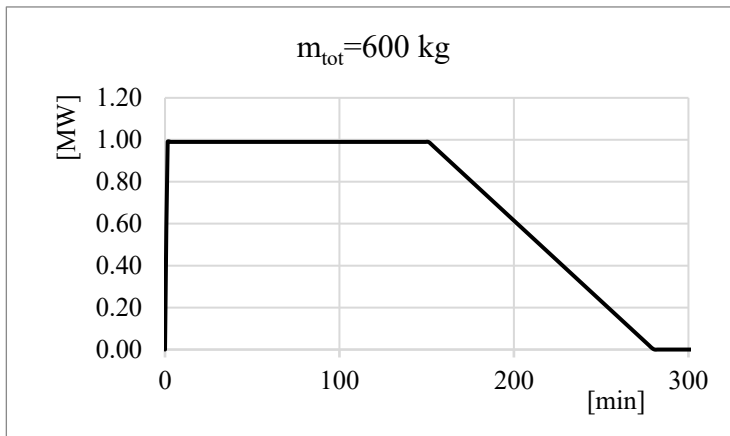


Figura 5-25 – Tende campali – Curva RHR con metodo  $t^2$

### 5.6.3 Razioni k

Le razioni viveri di pronto impiego, denominate comunemente ‘razioni k’, rappresentano uno strumento di supporto operativo ai militari impiegati in particolari contesti.

Da specifiche tecniche (36) le razioni devono possedere lo strato esterno costituito da

“...un accoppiato a sei strati costituito dai seguenti materiali, che si succedono, dall'esterno verso l'interno, nel seguente ordine:

- film di poliestere del peso di 17 g/m<sup>2</sup>;
- film di polietilene del peso variabile tra l'intervallo di 8 - 14 g/m<sup>2</sup>;
- lamina di alluminio del peso di 24,5 g/m<sup>2</sup>;
- film di polietilene del peso variabile tra l'intervallo di 8 - 14 g/m<sup>2</sup>;
- film poliammidico biorientato del peso di 17 g/m<sup>2</sup>;
- film di polietilene atossico del peso di 85 g/m<sup>2</sup>. “.

Per ogni pietanza equivalente sono indicate le quantità minime in peso e la tipologia di pietanza a seconda dell'impiego, in Figura 5-26 sono indicate, a titolo esemplificativo, le diverse tipologie di cibo in ciascuna razione viveri.

	MODULO "A" GIALLO	MODULO "B" ROSSO	MODULO "C" GRIGIO	MODULO "D" VERDE	MODULO "E" BIANCO	MODULO "F" ROSA	MODULO "G" AZZURRO
P R A N Z O	tortellini al ragù	pasta e fagioli	minestrone	ravioli al ragù	ravioli al ragù	minestrone	tortellini al ragù
	carne bovina	tacchino	tonno e piselli	tonno e piselli	carne suina	carne bovina	wurstel
	crackers (n. 2 confezioni)	crackers (n. 2 confezioni)	crackers (n. 2 confezioni)	crackers (n. 2 confezioni)	crackers (n. 2 confezioni)	crackers (n. 2 confezioni)	crackers (n. 2 confezioni)
	macedonia	macedonia	macedonia	macedonia	macedonia	macedonia	macedonia
	complesso polivitaminico	complesso polivitaminico	complesso polivitaminico	complesso polivitaminico	complesso polivitaminico	complesso polivitaminico	complesso polivitaminico
	caffè liofilizzato	caffè liofilizzato	caffè liofilizzato	caffè liofilizzato	caffè liofilizzato	caffè liofilizzato	caffè liofilizzato
	compresse crusca	compresse crusca	compresse crusca	compresse crusca	compresse crusca	compresse crusca	compresse crusca
	zucchero	zucchero	zucchero	zucchero	zucchero	zucchero	zucchero

Figura 5-26 - Esempio di configurazioni giornaliere di razioni *k*

Per valutare correttamente il carico di incendio associato a questa tipologia di materiale stoccato, si è fatto riferimento a test effettuati (27) i quali hanno riguardato cibi confezionati di varia natura (Figura 5-27), altri test effettuati presso il NIST (37), ma non rientrati in pubblicazioni (19), hanno confermato sia l’energia media rilasciata sia i valori di picco.

Sono comunque stati confrontati tali valori con le calorie del cibo contenuto nella tipica dose giornaliera di razioni *k* (colazione, pranzo, cena), ovvero circa 2800 Cal (Grandi Calorie) corrispondenti a circa 11.660 kJ per ogni razione. Il peso medio di ciascuna razione è stato ricavato dalle specifiche di aziende produttrici (38).

Con entrambi gli approcci si giunge ad un valore medio in peso del potere calorifico di 14 [MJ/kg].

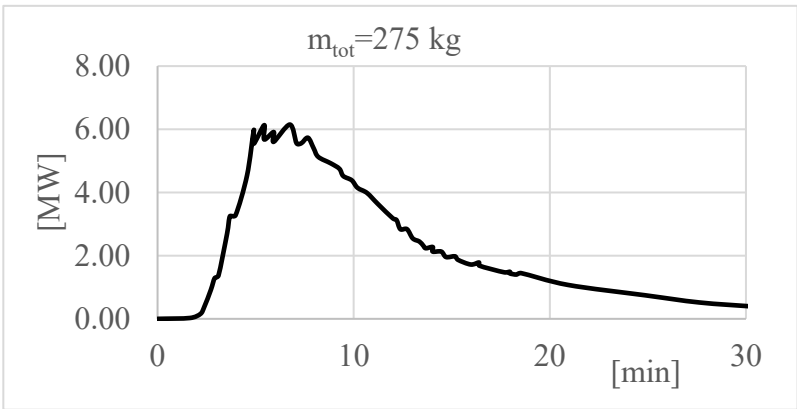


Figura 5-27 – Test su cibi confezionati



Le curve sperimentali sono state sviluppate su quantitativi pari a 275 kg, mentre i quantitativi stoccati di razioni k sono di circa 23.000 kg (cfr. 5.3).

Per poter quindi utilizzare alcune delle informazioni derivanti dalle curve sperimentali è stata implementata una curva  $t^2$  (in Figura 5-28), con i seguenti parametri:

- quantità totale di materiale di 7.670 kg, tenuto conto della modalità di stoccaggio che prevedeva 23.000 kg divisi in parti uguali in 3 posizioni differenti della pianta del compartimento;
- valore del potere calorifico di 14 [MJ/kg], come specificato sopra;
- il valore della velocità di crescita  $t_{[1MW]}$  è stato ricavato sulla curva sperimentale, considerato che è stato osservato che, al crescere dei quantitativi, la partecipazione all'incendio di tali materiali risulta solo discreta ( (27) e (19)).

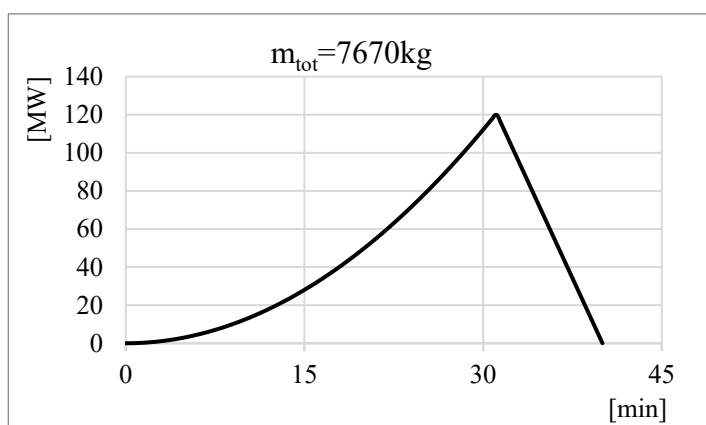


Figura 5-28 – RHR di 7670 kg di razioni k accatastate

## 5.6.4 Materiale farmaceutico

La natura eterogenea nelle sostanze riconducibili alla categoria dei farmaci non permette di definire un valore caratteristico di energia rilasciata in rapporto al peso, pertanto sono stati utilizzati alcuni valori di riferimenti (18), contenuti, peraltro nel database utilizzato dal programma Claraf, a cura dei VVF italiani. Il valore utilizzato è di 800 [MJ/m<sup>3</sup>] e si riferisce ad un volume stoccato di farmaci

in una stanza ‘tipo’. Pertanto sono state opportunamente considerate le modalità di accatastamento di tale materiale al fine di ottenere un potere calorifico totale di cui tener conto. Si è scelto di non considerare le indicazioni fornite dall’Handbook of Fire Protection Engineering 5th ed., poiché per la categoria ‘pharmaceutics’ sono forniti valori caratterizzati da elevate deviazioni standard e svolti su un numero di campioni molto basso (19).

Non avendo informazioni sulla velocità di crescita dell’incendio, e sul valore di picco di potenza, sono state implementate delle curve  $t^2$ , utilizzando il potere calorifico totale come calcolato con i parametri della tabella M.2 nel caso di edifici industriali del DM 03/08/2015 (2):

- $t_{[1MW]}=75s$ ;
- $RHR_t=1000 \text{ kW/m}^2$ .

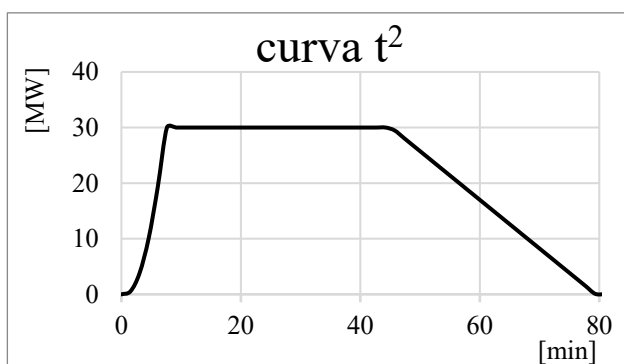


Figura 5-29 – Farmaci curva  $t^2$

### 5.6.5 Condizionatori, elettrodomestici, vestiario – altri scenari

Sono presenti anche altre tipologie di materiale stoccato in discrete quantità. Tuttavia gli scenari associati a questa tipologia non rappresentano quelli a più alto rischio. Sono riportate di seguito alcune curve di rilascio termico derivanti da prove di ignizione fatte su scala reale.

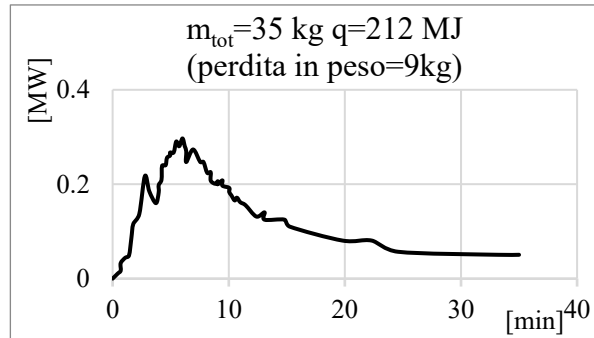


Figura 5-30 - Prove su scala reale di condizionatori (29)

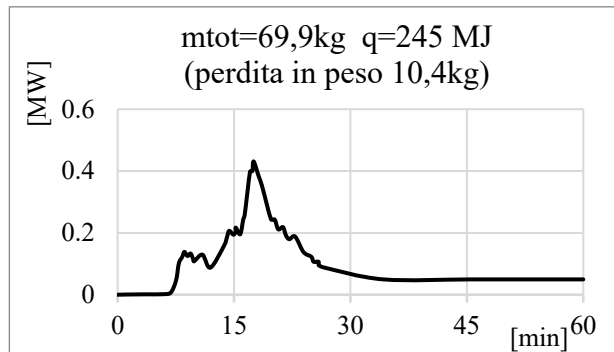


Figura 5-31 - Prove su scala reale di lavatrici (21)

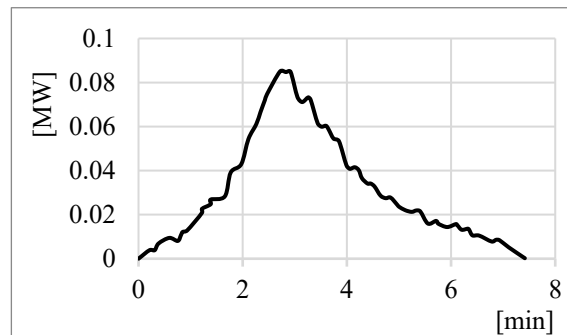


Figura 5-32 - Giacche da uomo prove in scala reale (39)

### 5.6.6 Autovetture di classe media

Nell'ambito dei lavori della ricerca europea è stata condotta un'indagine statistica sui casi di incendio verificatisi nelle autorimesse. Tra l'altro, questa indagine è stata finalizzata alla ricerca del numero di autovetture coinvolte nei casi di

incendio presi in esame dalla statistica. A questo proposito è stato trovato che il caso di incendio che coinvolge al massimo tre autovetture di classe 3 rappresenta l'involuppo del 98.7% degli scenari analizzati. I dati ottenuti dalle misurazioni sperimentali del rilascio termico delle singole autovetture hanno permesso di individuare una curva RHR rappresentativa del caso di incendio delle auto. Tra l'altro, essi hanno mostrato la validità della classificazione delle auto in base al loro potenziale termico. È stata così individuata la curva di rilascio termico (RHR) di progetto per un'auto di Classe 3: tale curva è riportata in Figura 5-33 rappresenta l'involuppo di tutti i dati sperimentali a disposizione.

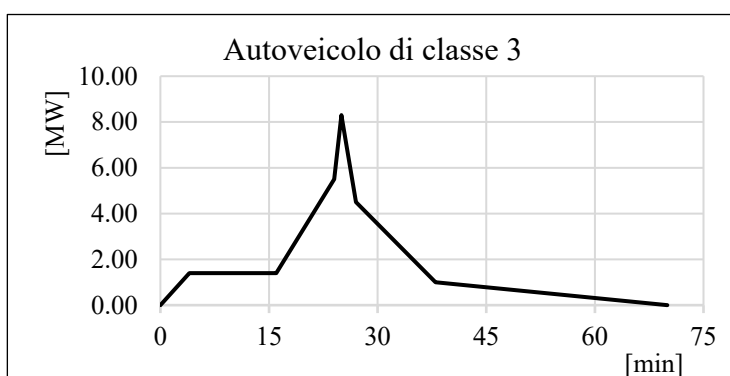


Figura 5-33 – Test in scala reale su autovetture di classe 3

Il 21 Febbraio 2017 è stata emanata la regola tecnica verticale sull'approccio ingegneristico per le autorimesse, che può essere utilizzata in alternativa alla precedente norma prescrittiva (i cui contenuti sono nel D.M.Int. 01/02/1986). Tale norma indica per gli approcci prestazionali le curve delle autovetture riportate in Figura 5-33. La norma costituisce l'allegato V.6 delle Norme tecniche di prevenzione incendi (DM 03/08/2015) (2).

## 5.7 Scenari di incendio e curve di rilascio termico

Dopo aver definito i carichi di incendio totali per ciascuno scenario considerato (par. 5.3) è stata implementata una curva RHR da considerare per le modellazioni

termofluidodinamiche necessarie a caratterizzare l'andamento delle temperature raggiunte nell'ambiente nello scenario considerato.

La curva di rilascio termico per lo 'scenario 1' (Figura 5-34) è definita utilizzando i seguenti parametri:

- razioni k – curva sperimentale (5.6.3);
- pallet – curva sperimentale (5.6.1)
- casse di legno – metodo  $t^2$  (conformemente al nuovo codice di prevenzione incendi (2));
- tempi di propagazione dell'incendio tra un carico e l'altro compresi tra 300s (=5 min) e 900s (=15min) a seconda del tipo di materiale e della distanza (19).

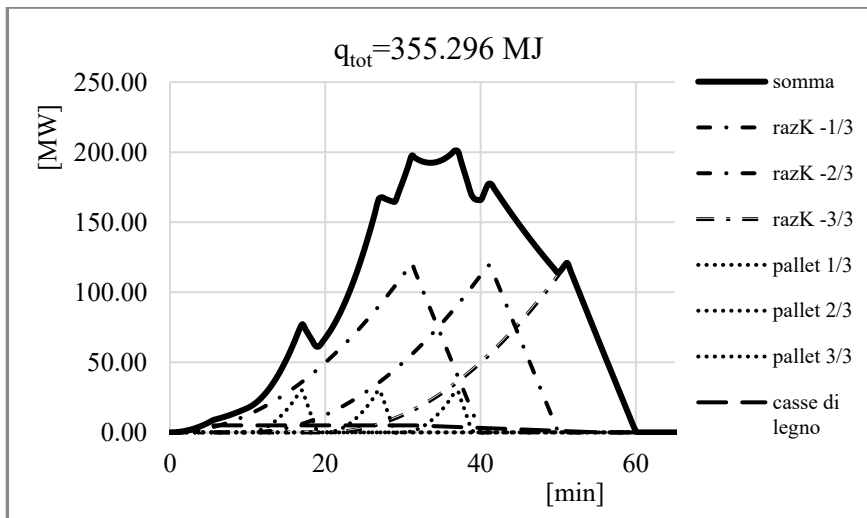


Figura 5-34 – Curva RHR dello scenario 1

La curva somma rappresenta i valori ottenuti sommando nel tempo i contributi singoli. L'ordine di grandezza raggiunto, di centinaia di MW, è dovuto alle considerevoli quantità di materiale stoccato in peso, nonché ai picchi di energia rilasciati dei singoli materiali.

La curva di rilascio termico per lo 'scenario 2' è definita utilizzando i seguenti parametri:

- tende – curva sperimentale (5.6.2);
- auto – curva sperimentale (5.6.6);

- farmaci – dati di letteratura (5.6.4);
- tempi di propagazione dell'incendio tra un carico e l'altro compresi tra 300s (=5 min) e 900s (=15min) a seconda del tipo di materiale e della distanza (19) e di dati di test sperimentali, come quelli disponibili per autovetture di media grandezza (40).

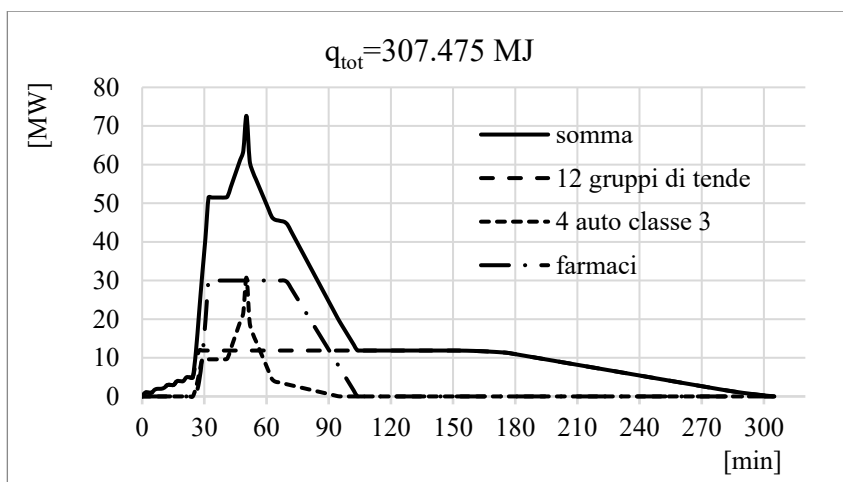


Figura 5-35 – Curva RHR totale scenario 2

Da un confronto tra le curve dei due scenari emerge come lo scenario 1 abbia una maggiore velocità di accrescimento e potenza massima.

### 5.7.1 Calcolo delle curve di incendio negli scenari considerati

Le curve di incendio naturali sono state ottenute con i programmi Ozone, CFAST e FDS. Gli aspetti di scelte di modellazione sono stati illustrati nel par. 4.

Di seguito le configurazioni implementate:

- configurazione 1: portone e finestre laterali aperte
- configurazione 2: portone chiuso e finestre laterali aperte
- configurazione 3: portone chiuso e finestre laterali attivate per  $T > 120^\circ\text{C}$

Per entrambi gli scenari descritti nel 5.7, sono state adottate tutte o parte delle configurazioni

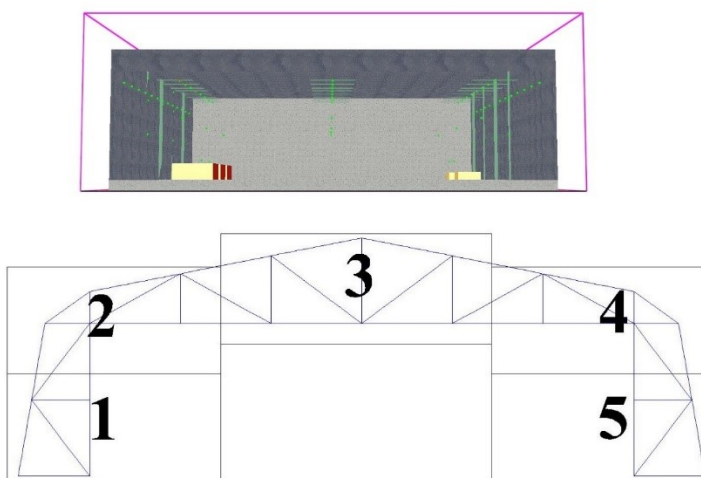
Gli scenari sono stati valutati con un modello FDS ponendo dei sensori AST (Adiabatic Surface Temperature) in corrispondenza degli elementi principali della trave reticolare componente la struttura principale.

I sensori che rilevano la temperatura AST sono stati posti in corrispondenza degli elementi strutturali principali della capriata, comprese le colonne in basso.

Infatti i carichi di incendio in questo compartimento sono molto vicini agli elementi strutturali, come si nota in Figura 5-36.



*Figura 5-36 – Alloggiamento dei materiali stoccati in prossimità degli elementi strutturali verticali*



*Figura 5-37 sono state rilevate le temperature AST con modello FDS (in alto) ed applicate a modello strutturale (in basso)*

### 5.7.2 Scenario 1

Lo scenario 1, come illustrato in 5.7, è caratterizzato da picchi di potenza elevati, ed una forte localizzazione dei carichi, che sono concentrati in pianta.

Di seguito le temperature ottenute con differenti configurazioni e quindi modellazioni.

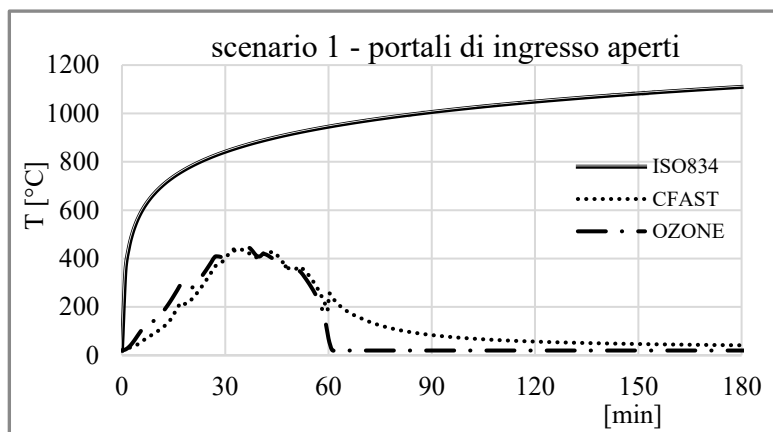


Figura 5-38 – Confronto temperature della zone superiore con la ISO834 (Scen1 config1)

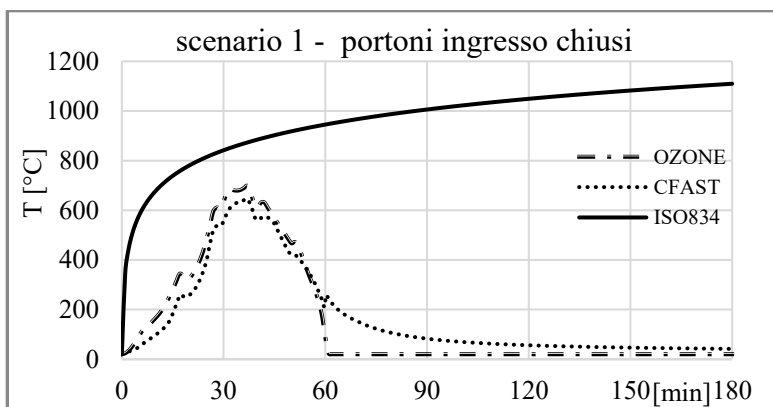


Figura 5-39 – Confronto temperature della zone superiore con la ISO834 (Scen1 config2)

La configurazione 1 prevede portali di ingresso e finestrate completamente aperti. Dal confronto riportato in Figura 5-38 e Figura 5-39, emerge come le curve di incendio naturali siano ben al di sotto della curva ISO standard. Seppure



occorre sottolineare gli incendi sono localizzati, e le temperature massime non sono valutabili con i modelli a zona.

Il programma FDS permette di porre dei sensori delle zone (chiamati “Layer Zoning Device” (7)) che restituiscono la temperatura, e le altezze dell’upper layer e del lower layer, in modo da poter operare un confronto con i modelli a zona. Tale confronto è riportato in Figura 5-40 e Figura 5-41, dove vi sono le temperature dei modelli a zona e quelle derivanti dai differenti sensori in pianta, posti nel modello CFD (nella legenda è possibile evincere le coordinate in pianta nel modello FDS).

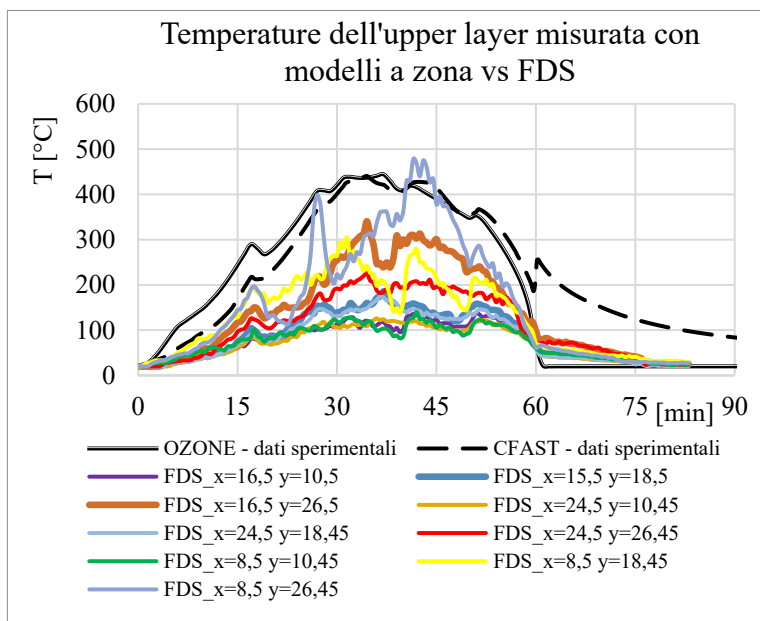


Figura 5-40 – Scenario I-portali aperti - Temperature “upper layer” rilevata da Ozone-CFAST e FDS in punti differenti in pianta

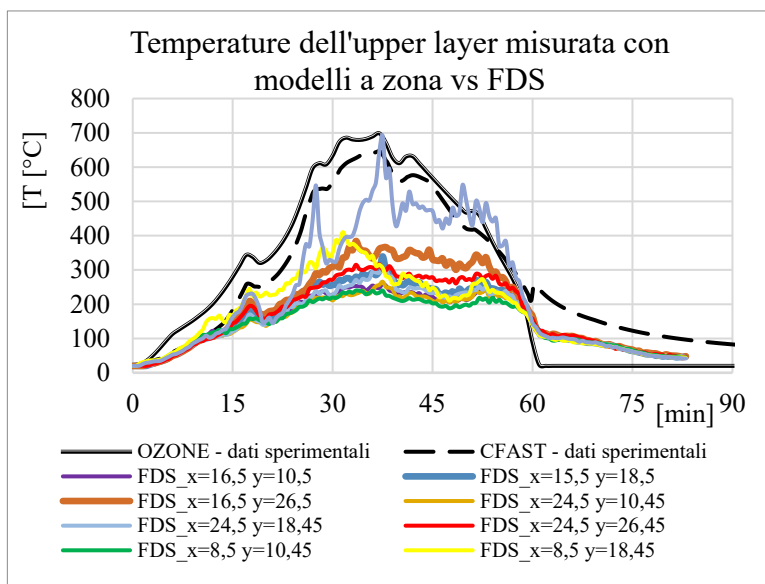


Figura 5-41 - Scenario 1-portali aperti - Temperature “upper layer” rilevata da Ozone-CFAST e FDS in punti differenti in pianta

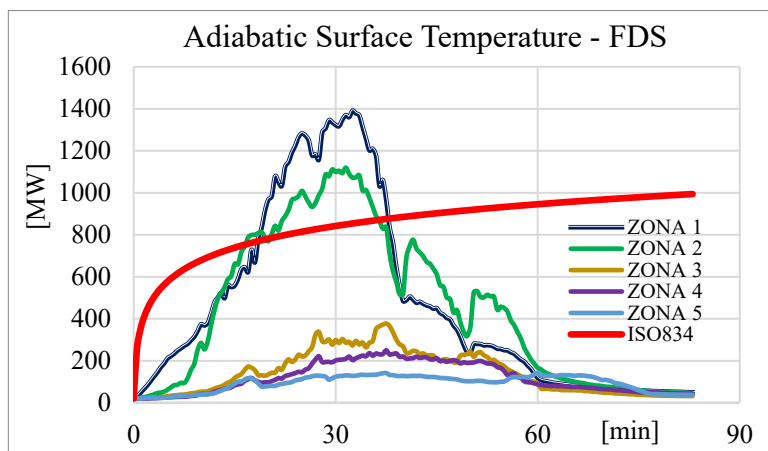


Figura 5-42 – Scenario 1 AST nelle 5 zone calcolate con modello CFD

Come si può evincere dalla Figura 5-42 la zona 1 è in corrispondenza delle zone di carico (foto in Figura 5-36), ed infatti le temperature di picco già poco dopo i 20 minuti raggiungono valori superiori a 1200 °C. Tale temperatura continua a crescere e restare sopra i 1200 °C per altri 10 minuti. Tali valori di temperatura sono sicuramente critici per qualsiasi sezione metallica (41), a prescindere dal suo fattore di utilizzo.

La zona 2 continua ad avere temperature molto elevate, mentre le zone 3,4 e 5 hanno valori molto bassi. Infatti i carichi di incendio non sono simmetrici in pianta, le temperature molto alte raggiunte confermano il criterio di scelta delle configurazioni critiche.

Con la modellazione avanzata si è riusciti quindi a cogliere alcuni aspetti altrimenti non evincibili con modelli a zone o approcci classici (ISO834):

- la forte localizzazione dei carichi di incendio e gli effetti sull'ambiente in termini di temperatura;
- le alte temperature raggiunte in corrispondenza di elementi strutturali.

In Figura 5-43 è riportata un'istantanea dell'incendio simulato con FDS tramite il post-processore Smokeview, nella quale sono visibili le temperature mediate sulla superficie degli elementi, quelle poste in Figura 5-42 hanno una maggiore precisione e sono ricavate dai sensori posti in corrispondenza degli elementi strutturali principali.

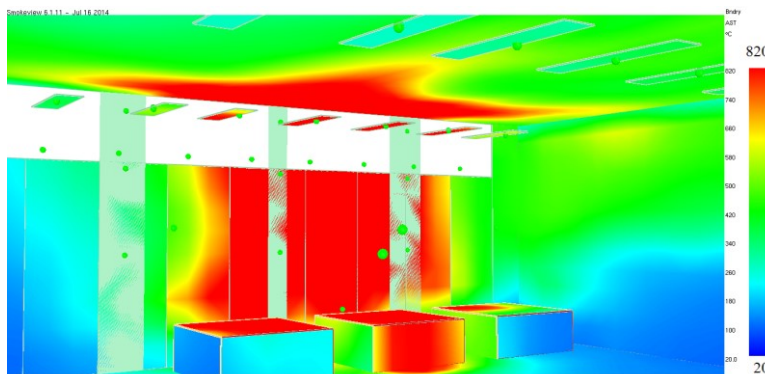


Figura 5-43 - Scenario 1 portoni chiusi – Rilievo temperature medie di AST a  $t=1690s$  (Smokeview)

### 5.7.2 Scenario 2

Lo scenario 2 è caratterizzato da una distribuzione in pianta più uniforme del carico di incendio, infatti pur avendo valori di carico di incendio simili, la maggiore diffusione dei materiali all'interno del compartimento genera picchi di potenza molto più bassi rispetto allo scenario 1 (come illustrato nel par.5.7).

In entrambe le configurazioni, portoni chiusi e portoni aperti, sono stati effettuati dei test di benchmark tra Ozone e CFAST (Figura 5-44 e Figura 5-45) e le curve

di temperatura hanno scostamenti non apprezzabili, eccetto nella fase di raffreddamento nella configurazione con portoni aperti.

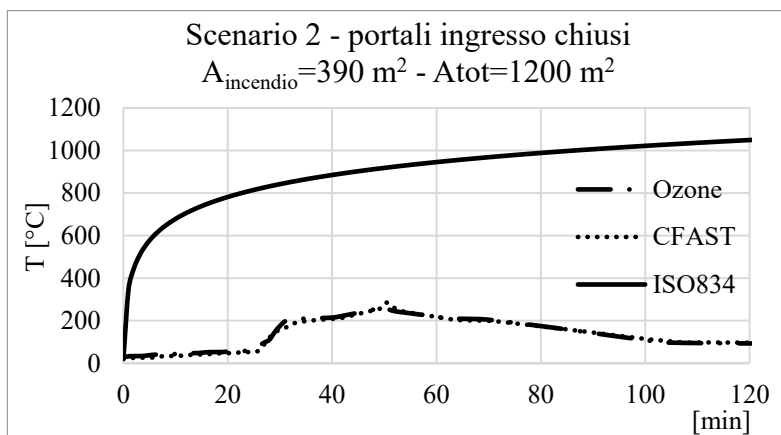


Figura 5-44 – Temperature modelli a zone – configurazione con portoni di ingresso chiusi

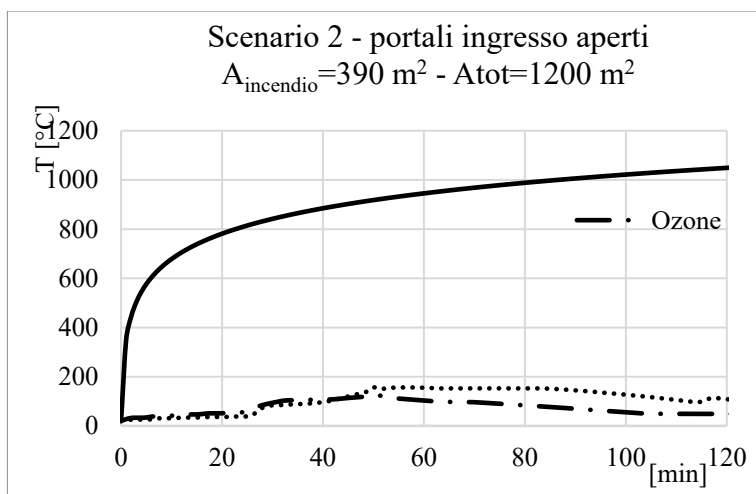


Figura 5-45 - Temperature modelli a zone – configurazione con portoni di ingresso aperti

Le massime temperature associate all'effettiva distribuzione del carico di incendio, sono state poi calcolate con modelli CFD più avanzati. Le zone indicate in Figura 5-46 fanno riferimento, come per il precedente scenario, allo schema adottato in Figura 5-39. Anche per lo scenario 2 le analisi termo-fluidodinamiche avanzate ottenute dal modello CFD sono in grado di fornire i valori massimi delle temperature nelle varie zone.

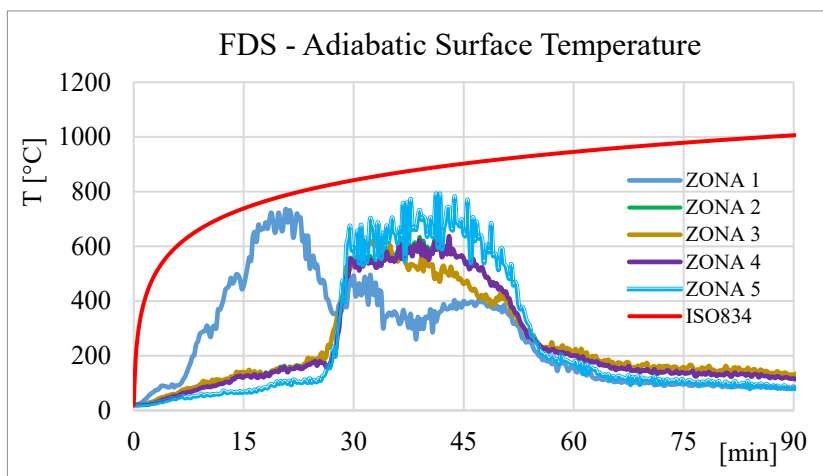


Figura 5-46 – Scenario 2 - AST nelle 5 zone calcolate con modello CFD

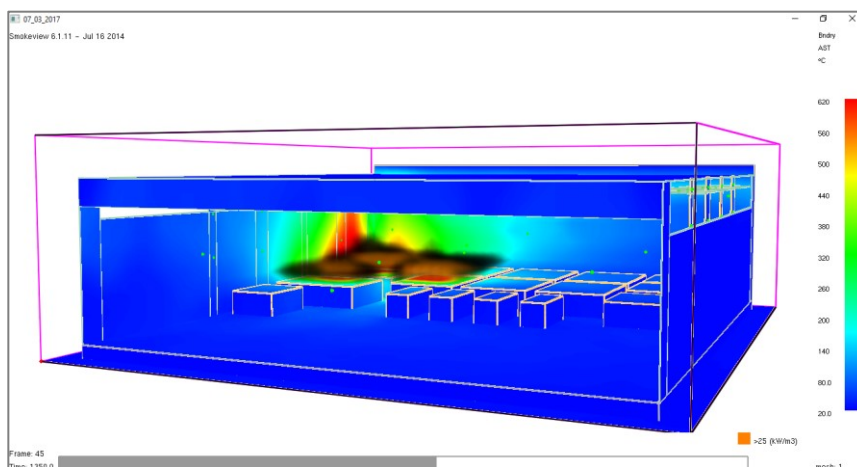


Figura 5-47 - Scenario 2 portoni aperti – Rilievo temperature medie di AST a  $t=1350s$  (Smokeview)

## 5.8 Analisi delle prestazioni di resistenza al fuoco

### 5.8.1 Livelli di prestazione di resistenza al fuoco e profili di rischio

Le analisi termo-strutturali sono state condotte sia con metodi prescrittivi sia con metodi prestazionali, operando un confronto tra gli approcci previsti da normativa (41) (2), alla luce dei livelli di prestazione di resistenza al fuoco richiesti per gli edifici industriali e depositi, a cui gli hangar in oggetto possono essere assimilati dal punto di vista tipologico, costruttivo e di destinazione d'uso. L'attività di stoccaggio in hangar non rientra tra le attività elencate nell'allegato 1 del DPR 151/2011. Non vi sono regole tecniche verticali per questa specifica categoria di edifici industriali.

I livelli di prestazione di resistenza al fuoco richiesti dal DM 03/08/2015 sono i seguenti:

Livello di prestazione	Descrizione
I	Assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale
II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione.
III	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio.
IV	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento della costruzione.
V	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità della costruzione stessa.

*Figura 5-48 – Livelli di prestazione per la resistenza al fuoco Tabella S.2.1 del DM 03/08/2015 (2)*

La scelta di attribuzione dei livelli è a cura del committente, anche se i criteri con i quali attribuirli devono essere coerenti con la tabella S.2.2 delle norme (Figura 5-49).

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Opere da Costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti e strutturalmente separate da esse e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni ad altre opere da costruzione;</li> <li>• adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• non adibite ad attività che comportino presenza di occupanti, ad esclusione di quella occasionale e di breve durata di personale addetto.</li> </ul>
II	Opere da Costruzione o porzioni di opere da costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti;</li> <li>• strutturalmente separate da altre opere da costruzione e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni alle stesse ovvero, in caso di assenza di separazione strutturale, tali che l'eventuale cedimento della porzione non arrechi danni al resto dell'opera da costruzione;</li> <li>• adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{vita}</math> compresi in A1, A2, A3, A4;</li> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• densità di affollamento non superiore a 0,2 persone/m<sup>2</sup>;</li> <li>• non prevalentemente destinate ad occupanti con disabilità;</li> <li>• aventi piani situati a quota compresa tra -5 m e 12 m.</li> </ul>
III	Opere da costruzione non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
IV, V	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza.

Figura 5-49- Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione tabella S.2.2 del DM 03/08/2015 (2)

L'attività è di tipo industriale o assimilabile dal punto di vista della prevenzione incendi, essendo il compartimento frequentato esclusivamente durante le operazioni di carico e scarico da personale qualificato e pienamente consapevole dell'ambiente nel quale opera. Inoltre l'hangar è compartimentato rispetto agli uffici retrostanti e non collegato strutturalmente ad altri edifici o attività.

Pertanto all'attività è associabile il livello di prestazione II, con i seguenti profili di rischio:

- $R_{vita}$  pari ad A4 (tabella G 3-5 del DM03/08/2015);
- $R_{beni}$  pari ad 1, a meno di differenti indicazioni della committenza riguardo alla tutela dei materiali all'interno di particolare valore o importanza strategica.

Il carico di incendio specifico di progetto dipende dalla configurazione adottata: infatti dividere il carico per l'area totale del compartimento è lecito per carichi che si presentano abbastanza uniformemente distribuiti.

Nello scenario 1 è emerso come ci sia una piccola area dove è concentrato il carico, ed infatti le temperature mostrate con FDS raggiungono localmente valori molto alti (Figura 5-42).

Ipotizzando di voler raggiungere un livello di prestazione III con la classe di ‘soluzioni conformi’ prevista dal DM2015 (2), ovvero adottando l’approccio prescrittivo nella terminologia classica, si utilizza la tabella S.2.3 della norma. Gli elementi strutturali devono avere le classi di resistenza all’incendio con riferimento a curve nominali, nello specifico la curva standard ISO834 (6).

I carichi di incendio specifici di progetto, nello scenario 1 superano i 2400 MJ/mq nelle zone di maggiore concentrazione: per tali situazioni, quindi, per raggiungere un livello di prestazione III occorre che le parti strutturali in prossimità dell’incendio abbiano almeno 240 minuti di resistenza all’incendio standard.

Carico di incendio specifico di progetto	Classe minima di resistenza al fuoco
$q_{t,d} \leq 200 \text{ MJ/m}^2$	Nessun requisito
$q_{t,d} \leq 300 \text{ MJ/m}^2$	15
$q_{t,d} \leq 450 \text{ MJ/m}^2$	30
$q_{t,d} \leq 600 \text{ MJ/m}^2$	45
$q_{t,d} \leq 900 \text{ MJ/m}^2$	60
$q_{t,d} \leq 1200 \text{ MJ/m}^2$	90
$q_{t,d} \leq 1800 \text{ MJ/m}^2$	120
$q_{t,d} \leq 2400 \text{ MJ/m}^2$	180
$q_{t,d} > 2400 \text{ MJ/m}^2$	240

*Figura 5-50- Classe minima di resistenza al fuoco Tabella S.2.3 del DM 03/08/2015 (2)*

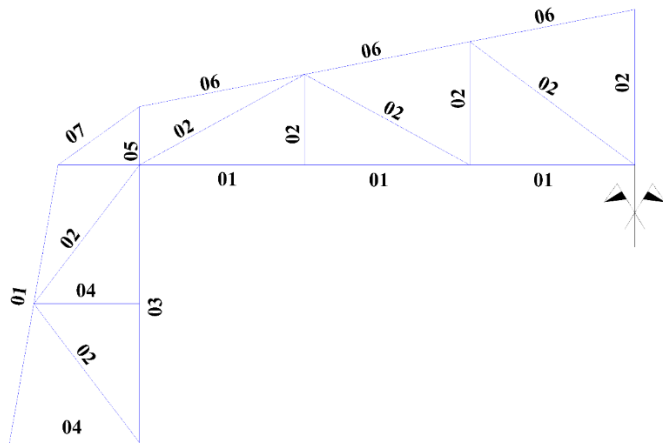
Adottando le soluzioni alternative, invece è possibile utilizzare le curve naturali di incendio, che possono tenere conto dell’effettiva distribuzione del carico d’incendio (vedi analisi con modello termo-fluido-dinamico avanzato - FDS), e misurare la capacità portante in rapporto alle temperature effettivamente raggiunte ed al tempo dell’incendio naturale.



5.8.2 Procedimento di calcolo semplificato delle sezioni attraverso il nomogramma

La resistenza al fuoco di un elemento con una data sezione dipende sia dal fattore di sezione, sia dal fattore di utilizzazione.

La struttura mostrata nel par. 5.2.3 possiede delle sezioni caratterizzate da valori alti di fattori di sezione ma con tassi di utilizzo molto bassi. Questo è dovuto ai recenti lavori di ristrutturazione dell’edificio, in quanto sono stati alleggeriti i carichi di esercizio con la rimozione di controsoffittature ed impianti esistenti, gravanti sulle capriate.



	sezione ( $f_y=286\text{MPa}$ )	tipo	A [cm <sup>2</sup> ]	N <sub>pl</sub> [kN]
01	doppio T	corrente inferiore e colonna	37	1058
02	4L 50x5	diagonale	19	543
03	doppio C	colonna	45.5	1301
04	2L 50x5	diagonale	9.5	272
05	doppia C	montante	28	801
06	2L 9,5x6,5	corrente superiore	30	858
07	cavo	tirante	79	2221

Figura 5-51 – Tipologia sezioni della capriata principale

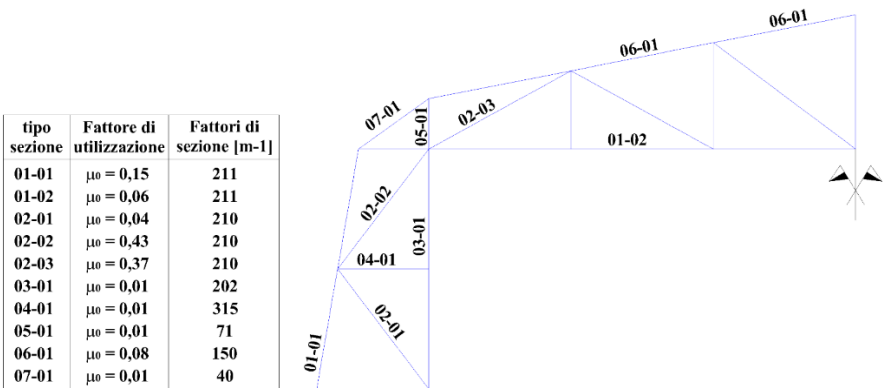


Figura 5-52 – Fattore di utilizzazione e fattore di sezione per i principali elementi strutturali

Per le sezioni caratterizzate da fattori di utilizzazione maggiore è stata operata una verifica semplificata applicando il nomogramma (42) per le sezioni con maggiore valore di fattore di utilizzo. Si ottiene così classe R0 per alcuni elementi diagonali Figura 5-54 e classe R15 per il corrente inferiore Figura 5-53.

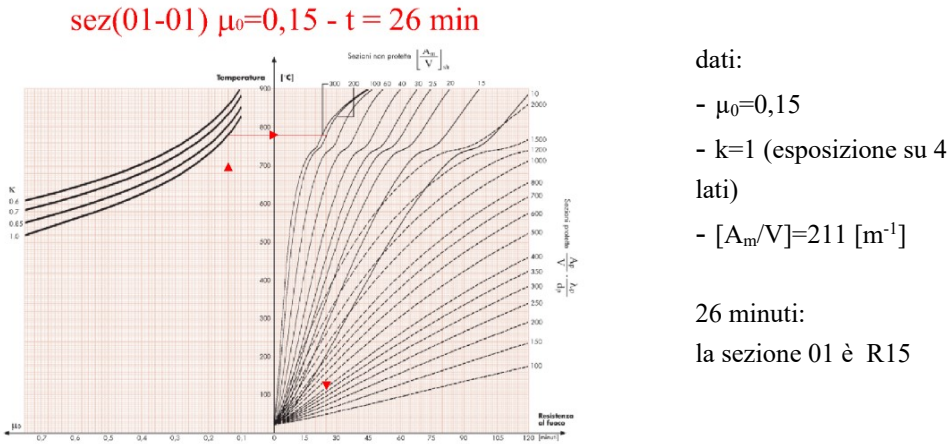
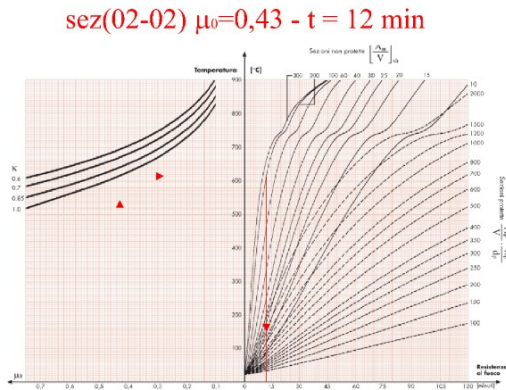


Figura 5-53 – Nomogramma per il corrente inferiore



dati:

- $\mu_0=0,43$
- $k=1$  (esposizione su 4 lati)
- $[A_m/V]=210 \text{ [m}^{-1}\text{]}$

12 minuti:

la sezione 02 è R0

Figura 5-54 – Nomogramma per gli elementi diagonali

Con un approccio semplificato la resistenza strutturale risulta R0. Per poter garantire prestazioni conformi ai livelli di prestazione richiesti, sono necessari quindi interventi.

Infatti, le “soluzioni conformi” (cfr S.2.4.2 del DM03/08/2015) richiedono le seguenti classi di resistenza nei confronti della curva nominale standard (ISO834):

- livello II: classe minima di resistenza pari a R30;
- livello III: classe minima di resistenza pari a R240.

### 5.8.3 Analisi termo-meccaniche

Sono stati implementati modelli strutturali avanzati per comprendere meglio il comportamento delle singole membrature ed il tipo di crisi sotto incendio, con il software SAFIR2016 (14), di cui si sono approfondite le ipotesi ed i metodi di calcolo nel par 4.2.

E' stata modellata la sottostruttura principale di cui si compone l'hangar, ovvero la capriata metallica con le seguenti scelte di modellazione:

- $f_y$  dell'acciaio pari a quello rilevato con provini (17), pari 286 MPa;
- aste imbullonate e vincolate con vincoli cerniera;

- la capriata giace su un piano ma è modellata in 3d, per cui lo sbandamento laterale fuori piano è ammesso;
- campi termici derivanti da curva ISO834 e curve d'incendio naturali.

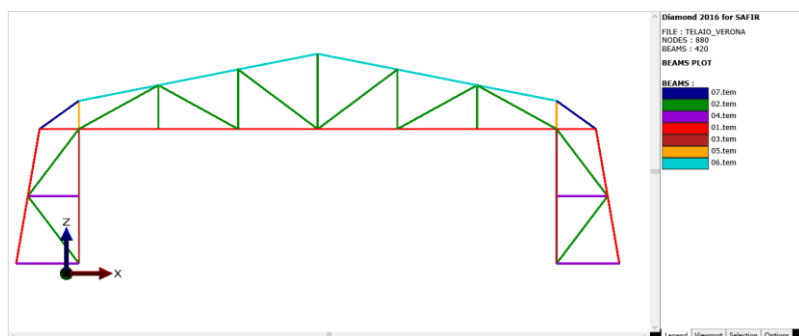


Figura 5-55 – Modello strutturale SAFIR2016 (14)

I campi di temperatura, come specificato nel par. 5.7.1, sono stati calcolati con scenari CFD implementati in FDS (7), utilizzando la temperatura AST (Adiabatic Surface Temperature) (12) agente sulle superfici strutturali.

Tali analisi termiche sono state quindi utilizzate per una modellazione strutturale in SAFIR (14), confrontando le sollecitazioni con le resistenze nel tempo.

Le resistenze, dipendenti anch'esse dalla temperatura, come già specificato, sono state calcolate con un codice di calcolo creato 'ad hoc', il quale permette di calcolare le caratteristiche inerziali delle sezioni modellate in SAFIR, e calcolare la resistenza nel tempo per sforzi di compressione, trazione, pressoflessione e tensoflessione, secondo i legami costitutivi degli Eurocodici (41).

Dato che le prestazioni di resistenza al fuoco della struttura sono al di sotto dei 15 minuti per tutti i metodi considerati, sono state modellate sezioni protette con vernici intumescenti dello spessore di 1200  $\mu\text{m}$ . Alle sezioni protette sono state applicate sia le curve di incendio convenzionali, sia le curve naturali dei due scenari di incendio.

Le analisi termiche con vernici intumescenti hanno riguardato le seguenti curve di incendio:

- curva nominale standard ISO834;
- curve di incendio naturale (scenario 2).

Lo scenario 1 non è stato considerato perché non si è avuto modo di verificare la validità delle ipotesi di base del modello meccanico di riferimento; infatti a causa delle elevate temperature raggiunte, 1400 °C per  $t=20\text{min}$  (par. 5.7.2), non si conosce la tenuta a tali temperature delle vernici, che potrebbero distaccarsi dai profili metallici, permettendo alle sezioni di raggiungere rapidamente la temperatura critica.

### 5.8.3 Struttura non protetta e curva standard ISO834

Si è applicato il campo termico derivante dalla curva standard ISO834 alle sezioni che formano la capriata.

In Figura 5-56 e Figura 5-57 sono riportate alcune analisi termiche su 2 sezioni effettuate con SAFIR secondo le indicazioni dell'Eurocodice 3.

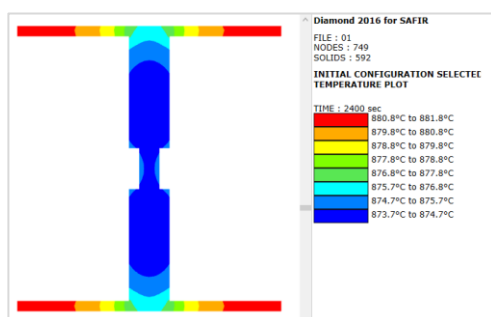


Figura 5-56 – Analisi termica corrente inferiore ISO834  $t=2400s$  (Diamond)

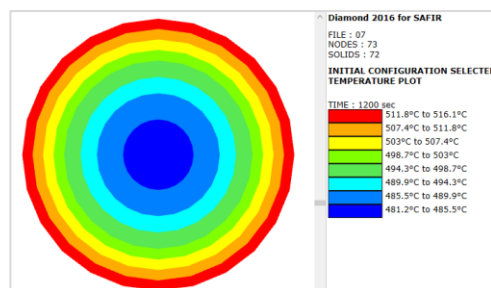


Figura 5-57 – Analisi termica sezione circolare piena in acciaio ISO834  $t=1200s$  (Diamond)

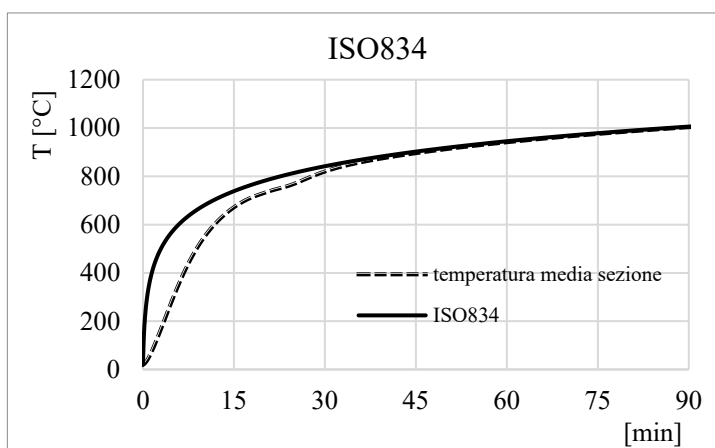


Figura 5-58 – Temperatura media corrente inferiore con curva ISO834

In Figura 5-58 sono riportate le temperature medie della sezione del corrente inferiore. Si nota come lo scostamento tra le due sia molto poco differito, sia nel tempo sia come valori assoluti. Questo a causa dell'alta conducibilità dell'acciaio da costruzione e degli spessori ridotti dei profili metallici. Attorno ai 731 °C in si nota un punto di transizione dovuto al calore specifico dell'acciaio, il quale a questa temperatura cresce rapidamente, per poi decrescere superati gli 800 °C, è possibile approfondire tale aspetto in (41).

Il modello strutturale implementato con SAFIR2016 dopo circa 380 s (6 minuti) non riesce più a risolvere le equazioni di equilibrio della struttura.

Tale aspetto non sorprende, specie se confrontato con i 12 minuti di resistenza del nomogramma. Il modello strutturale riesce a cogliere gli incrementi di tensione dovuti agli effetti iperstatici prodotti dalle dilatazioni termiche contrastate (si è operato un confronto con analisi simili fatte in (43)).

Per il seguente lavoro è stato implementato un programma di calcolo delle resistenze delle sezioni metalliche sotto incendio, il quale:

- importa le analisi termiche effettuate da SAFIR;
- calcola le caratteristiche inerziali della sezione;
- calcola il degrado termico dovuto alla temperatura in ogni elemento finito creato con SAFIR;
- indicando la lunghezza dell'elemento opera analisi di stabilità in conformità ai metodi dell'Eurocodice 3, illustrati (44).

Confrontando le sollecitazioni con le resistenze degli elementi ritenuti critici, si sono costruiti i diagrammi  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$ , indicando anche, sull'asse secondario a destra, le temperature medie della sezione.

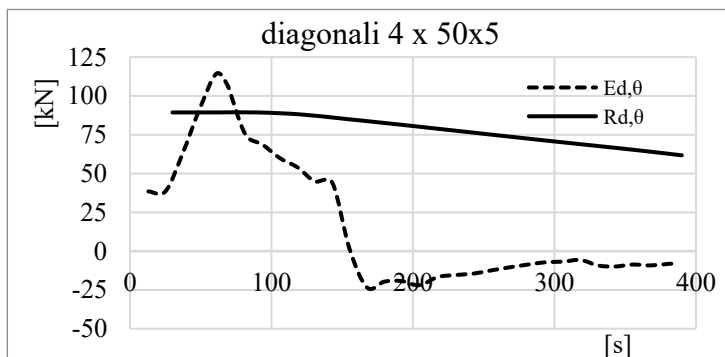


Figura 5-59 Sollecitazioni-Resistenze-Temperatura nel tempo per elemento diagonale (+ compress –tensione)

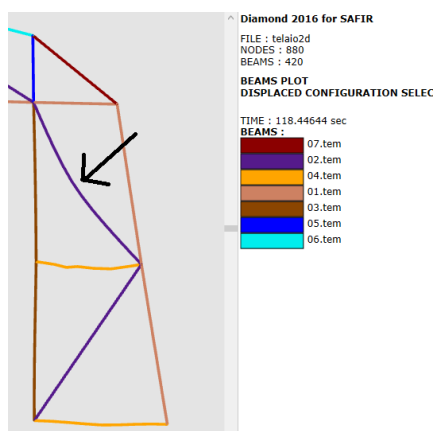


Figura 5-60 – Inizio sbandamento a 70s circa (Diamond)

Il diagonale indicato in figura si instabilizza per sforzi normali di compressione, proseguendo nel dominio del tempo, i valori di sollecitazione decrescono rapidamente (Figura 5-59). Gli spostamenti, in valore assoluto, del punto di mezzzeria confermano il superamento della soglia di resistenza prima dei 100s (Figura 5-60).

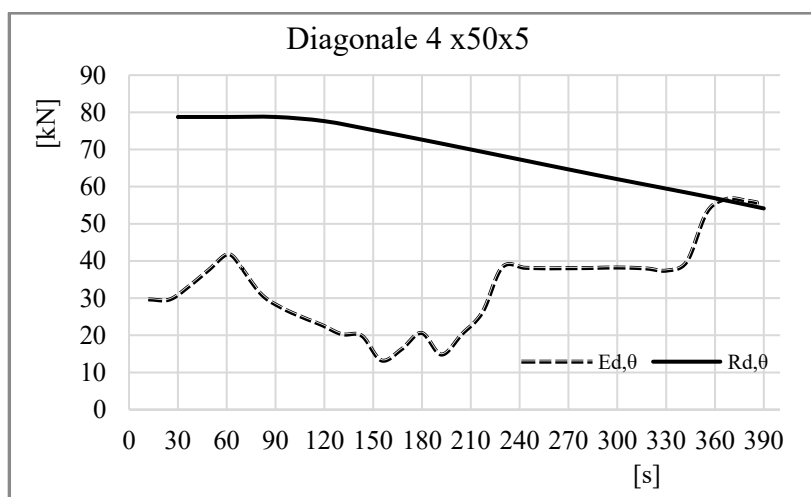


Figura 5-61 Sollecitazioni-Resistenze-Temperatura nel tempo per elementi diagonali (+ compress –tensione)

L'analisi si interrompe quando il diagonale di collegamento tra corrente superiore ed appoggio si instabilizza, infatti la travatura reticolare non è più in grado di trasmettere i carichi verticali agli appoggi, garantendo l'equilibrio.

### 5.8.3 Struttura non protetta e curve di incendio naturali (scenario 1)

La modellazione degli scenari con l'analisi termofluidodinamica avanzata (tramite il software FDS) ha permesso di conoscere i campi di temperatura agenti per l'intera durata dell'incendio all'interno dell'hangar.

I vantaggi emergono soprattutto nei casi di incendio localizzato. Ovvero quelli nei quali si riesce a comprendere quali zone siano sottoposte a gradienti termici tali da poter causare il collasso strutturale e quali zone non risultano esposte a temperature molto alte, riuscendo pertanto a garantire la portanza strutturale per l'intera durata dell'incendio. Sono state ricavate le curve di incendio relative allo scenario 1 (cfr. par. 5.7.2), visto che tale scenario è il più gravoso in termini di temperature massime.

Tuttavia occorre chiarire che lo scenario 2, sebbene abbia temperature più blande, massimizza gli effetti dell'incendio in corrispondenza della zona 3, essendo caratterizzato da carichi di incendio maggiormente distribuiti in pianta.



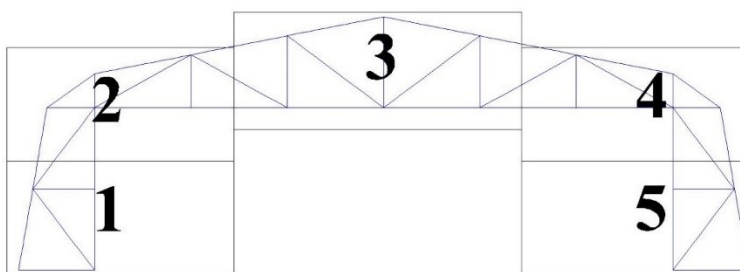
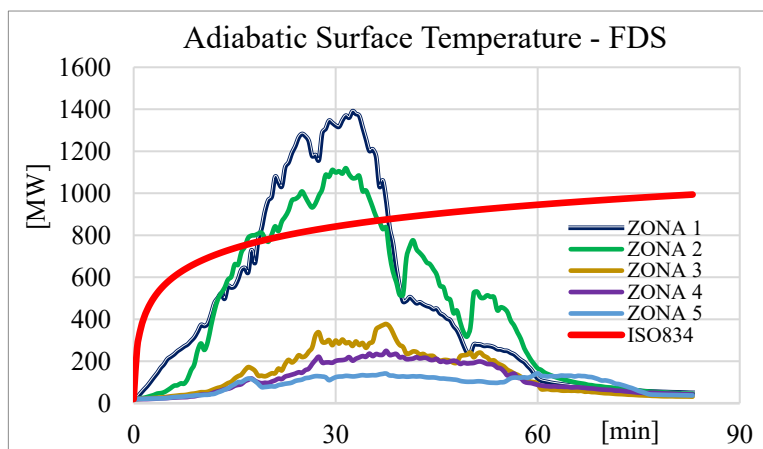


Figura 5-62 Zone dove sono stati posti dei sensori  
AST (Adiabatic Surface Temperature) per rilevare le differenze di temperatura

Per ogni sezione quindi sono state condotte analisi termiche nelle zone dell'hangar.

In Figura 5-63 sono riportate le temperature della sezione del corrente inferiore a seconda della zona di incendio in cui si trovi.



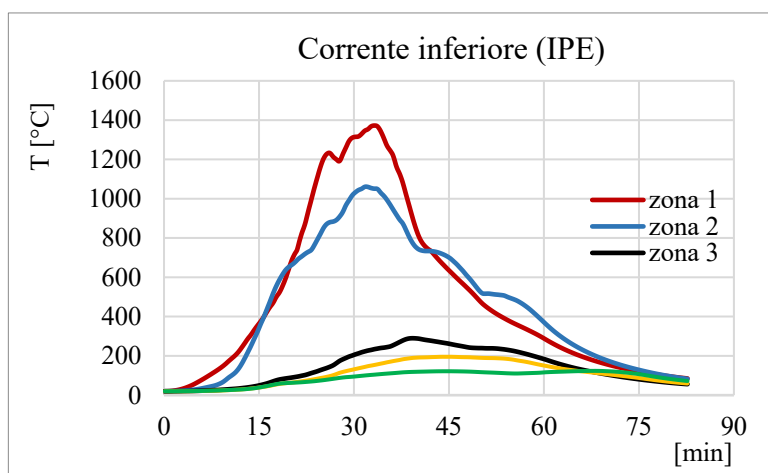


Figura 5-63 – Temperature del corrente inferiore nelle zone di incendio

Il programma non trova valori di convergenza dopo circa 10 minuti, molto prima che le temperature salgano a valori critici. Questo è dovuto agli effetti iperstatici.

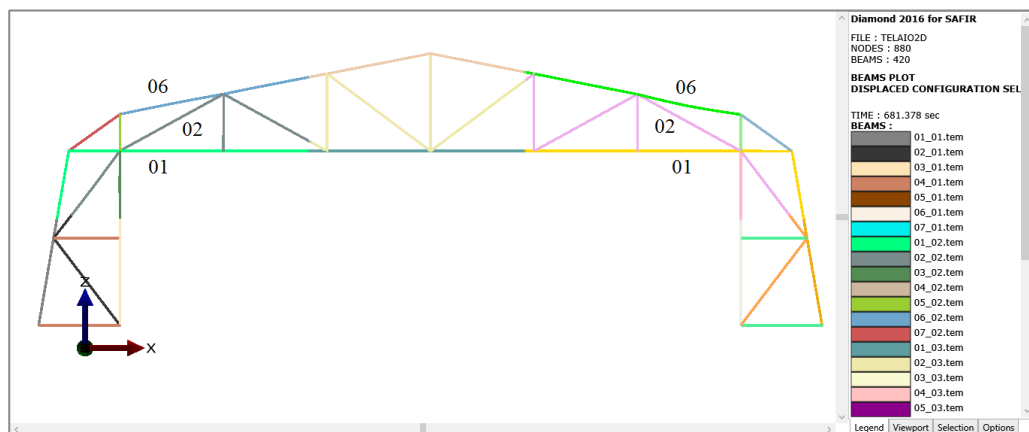


Figura 5-64 – Modello strutturale SAFIR con curve di incendio FDS

La capriata in corrispondenza degli appoggi, trasmette gli sforzi tramite i correnti superiori (06), correnti inferiori (01) e diagonali (02), in riferimento alla Figura 5-64. Quindi se uno di questi elementi raggiunge la crisi strutturale, l'intera struttura diventa labile (i nodi sono bullonati e modellati come cerniere interne). Sono presenti delle orditure nella direzione perpendicolare al piano (non modellate), consistenti in tiranti o sezioni metalliche molto sottili, le quali svolgono funzione esclusivamente funzione di vincolo per la stabilità laterale

della capriata, con spostamento dei nodi impedito nella direzione normale al piano della capriata.

I confronti tra capacità e domanda di questi elementi consentono di comprendere il meccanismo di collasso.

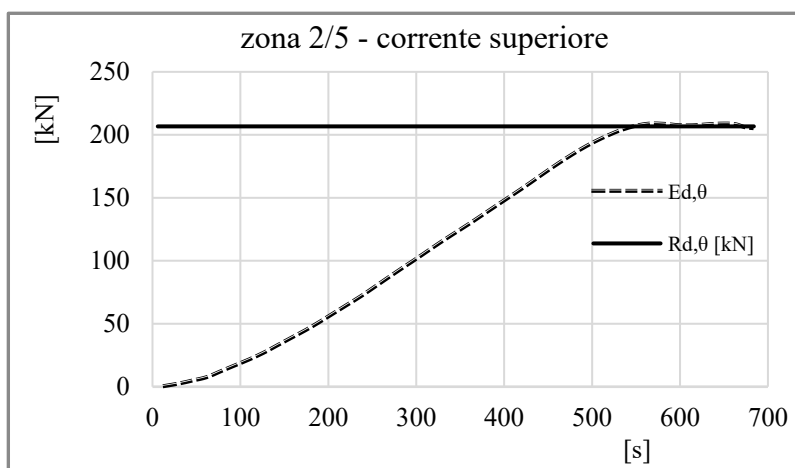


Figura 5-65 – Verifica corrente superiore SX (sez06)

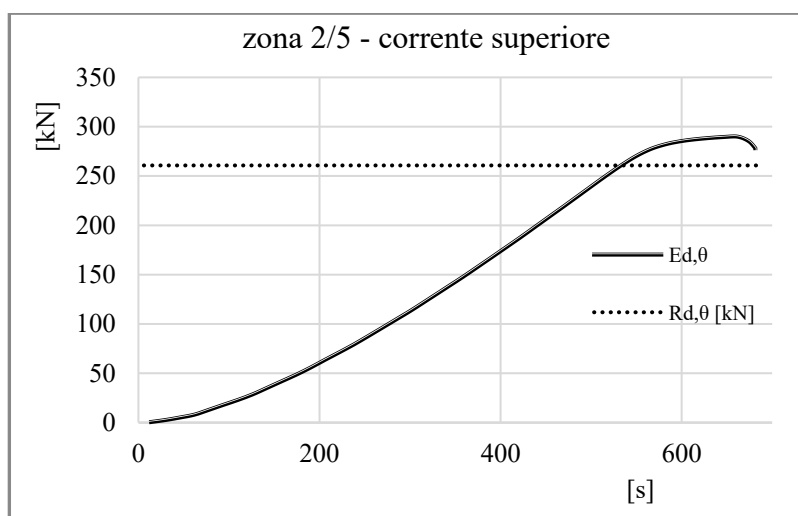


Figura 5-66 – Verifica corrente superiore DX (sez06)

In questo scenario di incendio, quindi, utilizzando analisi avanzate è possibile tenere in conto gli effetti che un incendio localizzato posto nella parte sinistra della struttura ha sull'intera capriata.

Sono riportate in Figura 5-65 e Figura 5-66 gli andamenti delle sollecitazioni dei correnti superiori nel lato sinistro, caratterizzato da temperature più alte, e nel lato destro, con temperature più basse.

Le temperature delle due sezioni sono differenti, 100 °C vs 30 °C, tuttavia non causano una diminuzione di rigidità e resistenza. La crisi viene raggiunta, per entrambi, per il crescere dello sforzo normale assiale dovuto ad effetti termici.

### 5.8.3 Struttura protetta e curva di incendio standard ISO834

I parametri di modellazione delle caratteristiche delle vernici intumescenti sono stati scelti con riferimento ad una campagna di test ed indagini in forno effettuati su vernici intumescenti, a cui si rimanda per approfondimenti (45).

Le analisi termiche indicano differenze di temperatura importanti, tra l'esterno, dove è applicata la vernice, e l'interno della sezione. In Figura 5-67 è riportato il campo di temperature nella sezione a  $t=25$  min: la temperatura esterna è di circa 774 °C, quella della sezione è di 521 °C. Questi valori si desumono anche dall'andamento riportato in Figura 5-68.

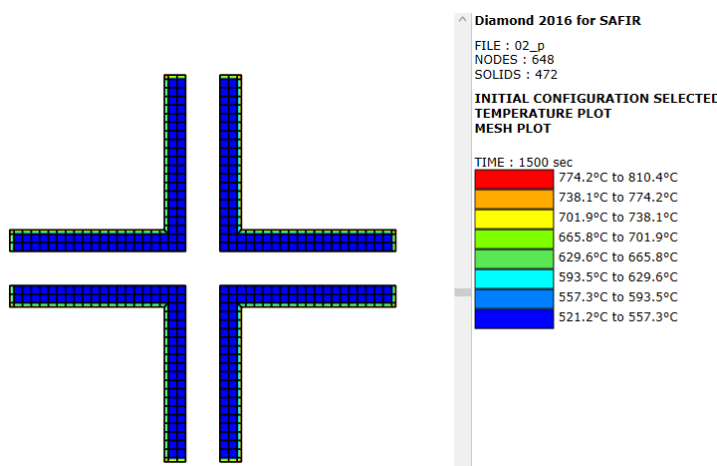


Figura 5-67 – Sezione 4 angolari 50x5 con vernici intumescenti  $t=25$  min (Diamond)

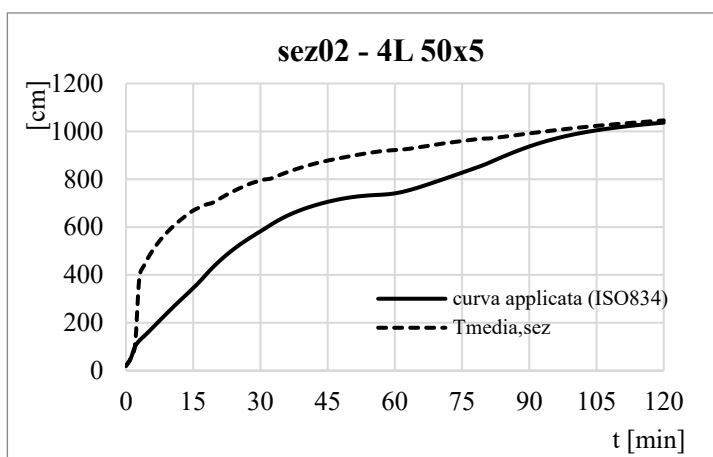
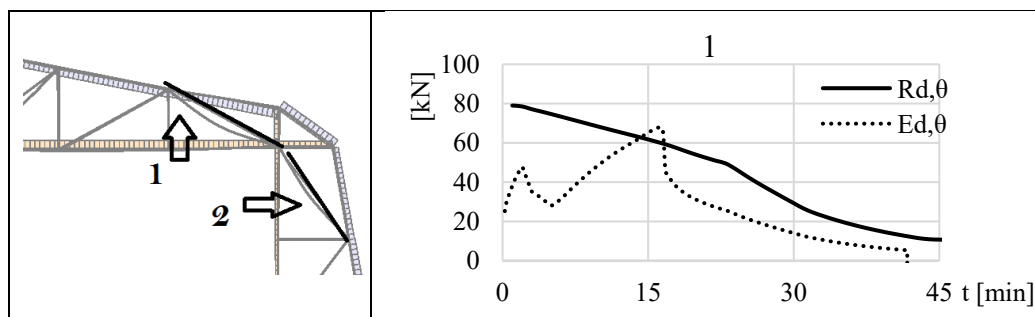


Figura 5-68 – Temperature sezione02 con vernici intumescenti

La modellazione strutturale avanzata (SAFIR), consente di conoscere l'andamento delle sollecitazioni nel tempo. Per comprendere quale tipologia di crisi strutturale sia avvenuta, occorre confrontare queste sollecitazioni con i valori di resistenza, che degradano con la temperatura.

Nel caso in esame (curva di incendio ISO834 applicata su sezioni protette con vernici intumescenti di spessore 1200  $\mu\text{m}$ ), alcuni diagonali compressi raggiungono la crisi per instabilità a sforzo normale di compressione, causando una redistribuzione degli sforzi all'interno della trave reticolare (Figura 5-69).



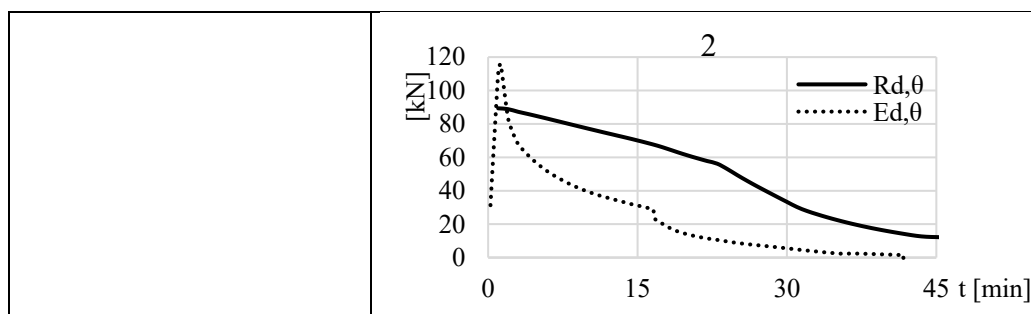


Figura 5-69 – Instabilizzazione per sforzi di compressione dei diagonali

La crisi strutturale avviene per  $t=42$  min (2500s) a causa di una labilità provocata dalla crisi del diagonale indicato in Figura 5-70.

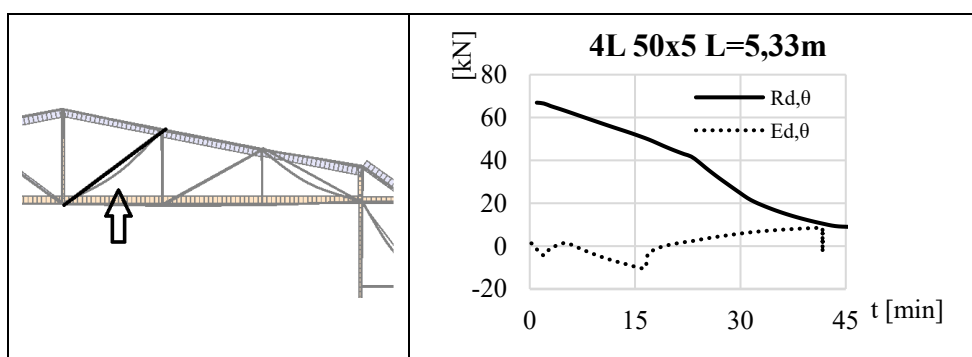


Figura 5-70 – Crisi strutturale per instabilità a sforzo normale  $t=42$  min (2500s)

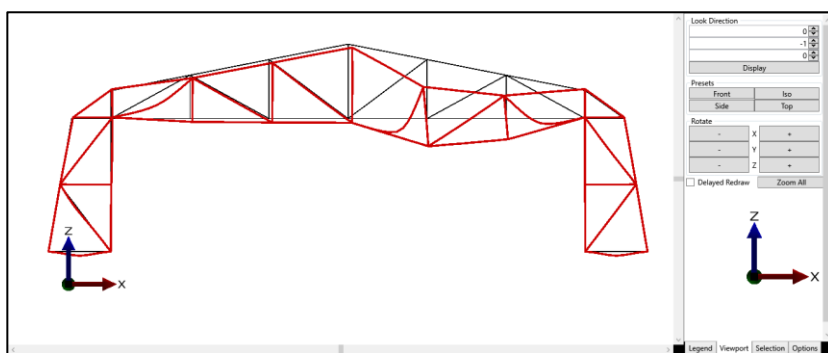


Figura 5-71 – Struttura protetta con vernici intumescenti di  $\mu 1200$  mm, curva incendio ISO834,  $t=42$  min (2500 s) – (scala spostamenti  $\times 1$ )

La struttura perde la sua capacità portante poiché la crisi dell'elemento diagonale in Figura 5-70 causa una labilità, come mostrato in Figura 5-71.

Utilizzando, quindi, la curva di incendio ISO834, nonostante le protezioni applicate, la struttura presenta una resistenza strutturale nel dominio del tempo (cfr. (44)), di 40 minuti circa. Il requisito di prestazione richiesto, invece, è di R60, nel caso in cui lo scenario 2 (carichi di incendio distribuiti) sia quello più probabile, e R240 qualora lo scenario 1 (incendi localizzati) descriva meglio la situazione reale.

### 5.8.3 Struttura protetta e curva di incendio naturale dello scenario 2 (distribuiti)

Sono state approntate analisi con struttura protetta e curva di incendio naturale dello scenario 2 (carichi di incendio distribuiti). In questa condizione la struttura non raggiunge alcun tipo di collasso strutturale.

In Figura 5-72 si possono osservare le temperature medie in una sezione protetta, applicando curve di incendio differenti.

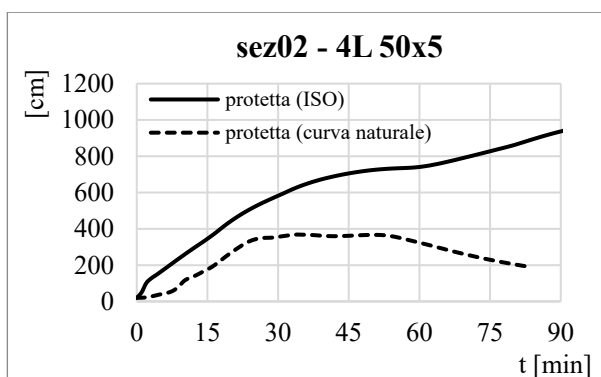


Figura 5-72 Confronto della temperatura di una sezione protetta con vernice intumescente 1200  $\mu\text{m}$  (ISO e curve naturali d'incendio)

Risulta utile, inoltre, riportare l'andamento delle temperature, per sezione protetta e non protetta, sottoposta a curve di incendio naturali. In Figura 5-85 è possibile apprezzare come gli alti valori di isolamento termico offerto dalle vernici intumescenti, permettano di avere gradienti termici importanti, tale da non far risentire alla sezione dell'aumento improvviso di temperatura, dovuto al picco di potenza termica locale. Questo influisce positivamente sulle resistenze

in funzione della temperatura, preservando i materiali dal degrado meccanico dovuto alle temperature.

Nello specifico questa sezione presenta una temperatura media, se protetta, sempre inferiore a 400 °C. A questa temperatura l'acciaio conserva ancora tutta la sua capacità di resistenza plastica ed una riduzione di rigidità del 30%.

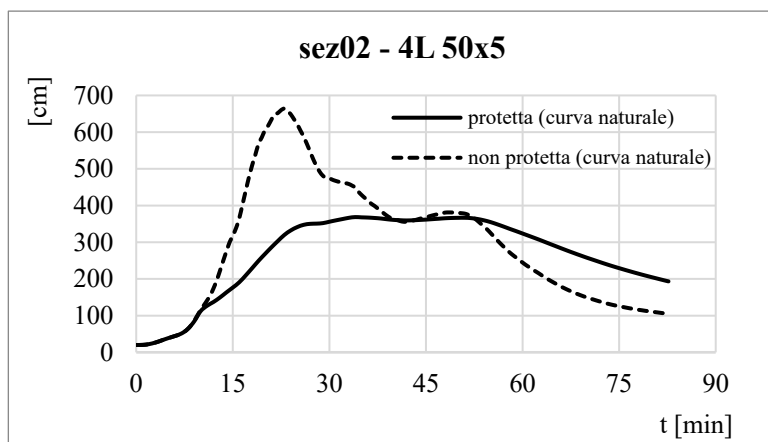
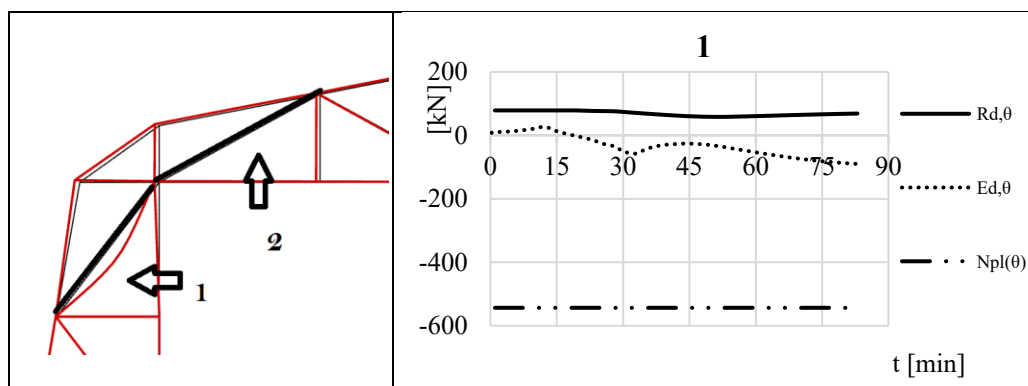


Figura 5-73 Confronto della temperatura della sezione con curve naturali di incendio (non protetta e protetta con vernice intumescente 1200  $\mu\text{m}$ )

Con questi campi di temperatura, si instabilizza un diagonale, Figura 5-69, ma questo non compromette la capacità portante della struttura.





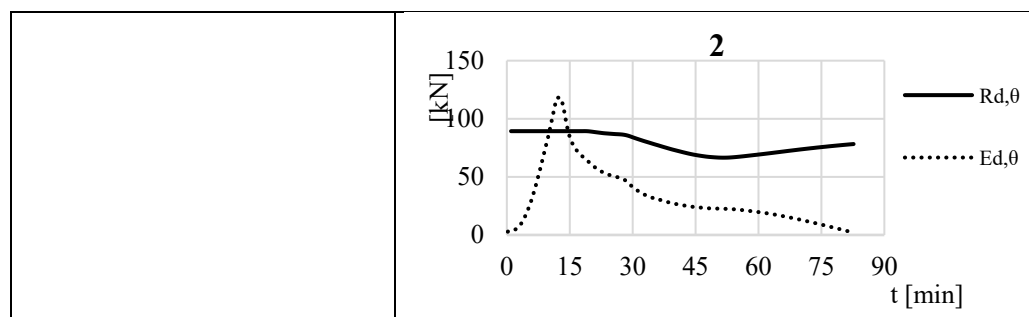


Figura 5-74 –Sforzo normale sui diagonali (positivi compressione, negativi trazione)

### 5.8.3 Struttura parzialmente protetta e curva di incendio standard ISO834

Utilizzando i dati di sollecitazione e di resistenza disponibili per le analisi di struttura protetta e non protetta, con una back-analysis sono state individuate le sezioni critiche, ovvero quelle che comprometterebbero l'equilibrio in caso di crisi, causando il collasso per labilità.

Tali sezioni, riportate in Figura 5-75, sono costituite dal corrente superiore ed inferiore, a cui sono affidati i compiti di trasmissione dei carichi verticali, e i diagonali compressi. Come mostrato nelle configurazioni precedenti, i diagonali, caratterizzati da fattori d'utilizzazione molto alti e lunghezze considerevoli, raggiungendo la crisi, diventano responsabili del collasso della struttura.

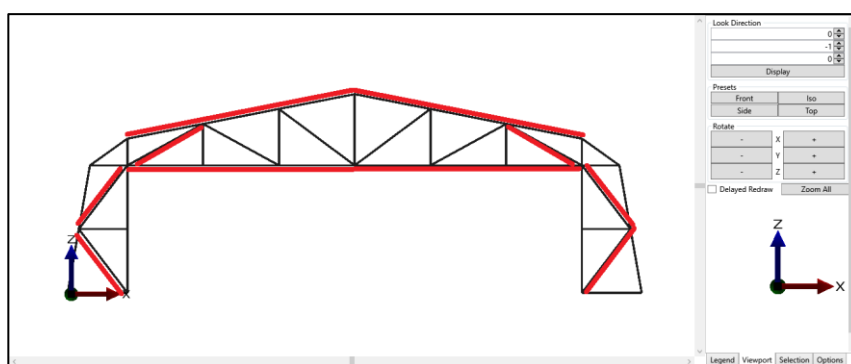


Figura 5-75 –Selezione, tramite back-analysis, delle sezioni da proteggere.

Dato che la struttura, interamente protetta e sottoposta alla curva ISO834, raggiunge il collasso dopo 42min senza soddisfare il requisito (R60), non ci si aspetta risultato migliore proteggendola solo in parte. Dunque l'analisi, con

struttura protetta in parte e con curva convenzionale di incendio, è stata compiuta al solo fine di verificare se il criterio di selezione degli elementi da proteggere sia valido, ovvero che la capacità di resistenza si ottiene nel dominio del tempo, confrontata con struttura non protetta.

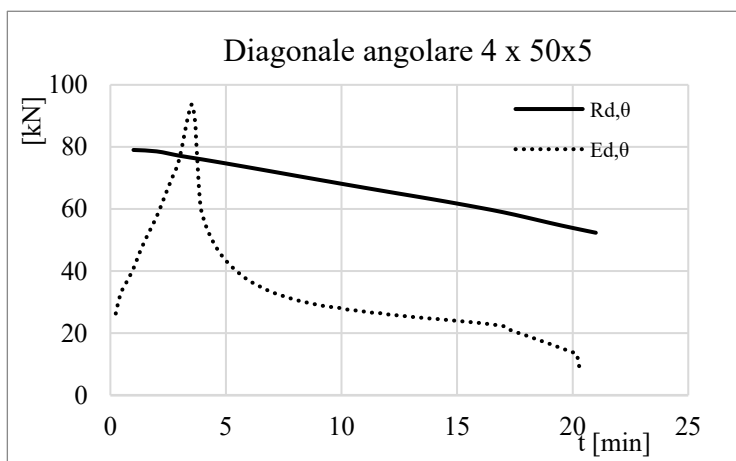


Figura 5-76 – Sollecitazione-Resistenza per sforzo normale assiale di compressione

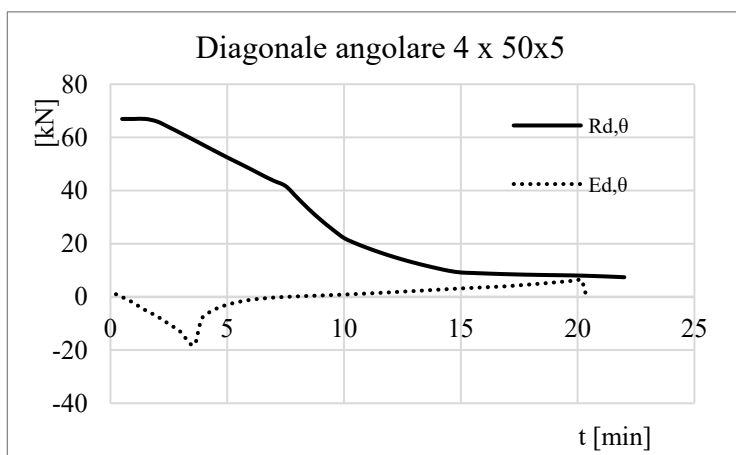


Figura 5-77 – Sollecitazione-Resistenza per sforzo normale assiale di compressione

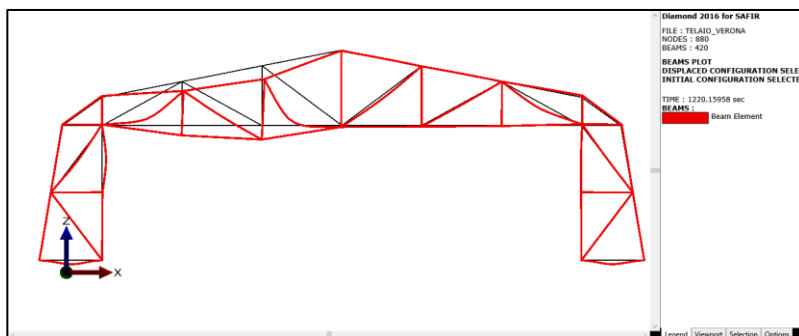


Figura 5-78 – Struttura parzialmente protetta con vernici intumescenti di  $\mu 1200$  mm, curva incendio ISO834,  $t=20$  min (1210 s) – (scala spostamenti  $\times 1$ )

La struttura raggiunge il collasso attorno ai 21 minuti, tale prestazione è molto maggiore dei 7 minuti della struttura non protetta con curva di incendio ISO834, seppure inferiore ai 42 minuti con struttura interamente protetta.

In questo caso il diagonale in prossimità dell'appoggio perde la sua capacità di resistenza già prima dei 5 minuti (Figura 5-76), la struttura, tuttavia, diventa labile solo quando anche il diagonale in mezzeria va in crisi per sforzo di compressione assiale (Figura 5-79).

Il campo di spostamenti dopo 21 minuti è riportato in Figura 5-85, nel quale è possibile notare la struttura prossima al collasso.

### 5.8.3 Struttura parzialmente protetta e curve di incendio naturali (scenario 2)

La struttura in questa configurazione non arriva al collasso, anche durante la fase di raffreddamento. Tuttavia esiste un grado di danneggiamento dovuto all'instabilizzazione del corrente superiore (Figura 5-79).

La resistenza strutturale mostrata in questa condizione conferma l'efficacia del metodo di selezione delle sezioni da proteggere.

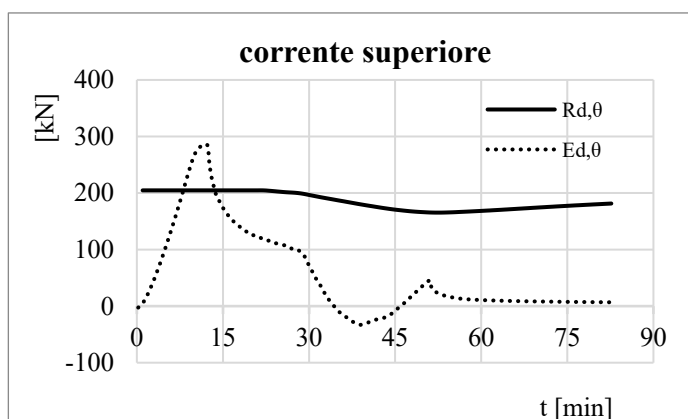


Figura 5-79 – Sollecitazione-resistenza nel corrente superiore

Questa configurazione dimostra la capacità di resistenza della struttura protetta sugli elementi critici. Ipotizzando un'applicazione progettuale, lo sforzo compiuto per selezionare, con analisi opportune, le sezioni critiche presenterebbe il vantaggio economico della riduzione dei costi di intervento rispetto alla protezione totale. Considerata la vetustà della struttura esistente (costruita negli anni '50), questo aspetto è fondamentale in una eventuale valutazione dei costi e dei benefici dell'intervento, in rapporto al valore attualizzato dell'edificio, ed alla sua vita utile rimasta.

## 5.9 Commenti ai risultati ottenuti

### 5.9.1 Considerazioni su parametri di normativa consigliati per edifici industriali

In questo capitolo sono state illustrate le curve RHR (Rate of Heat Release), modellate determinando i carichi a partire da dati sperimentali disponibili.

Purtroppo nelle applicazioni ingegneristiche, questo non è sempre possibile. Infatti esistono oggettive difficoltà nel reperire test e sperimentazioni di tutti i materiali dei compartimenti coinvolti nella progettazione della sicurezza incendio.

Il giudizio esperto di un ingegnere che si occupa di sicurezza incendio, per approcci prestazionali, è sicuramente opportuno. Infatti i test sperimentali effettuati al cono calorimetrico di una certa sostanza, si riferiscono a poche configurazioni di accatastamento e a quantità note non variabili.

L'operazione di adattamento delle curve sperimentali alle quantità e alle tipologie di accatastamento dello scenario reale è consigliabile sia effettuato da giudizio esperto. D'altra parte il nuovo codice di prevenzione incendi (2) fornisce alcune indicazioni sugli edifici industriali nella tabella M.2.2 (Figura 5-80).

Parametro	Focolare predefinito	
	per attività civile	per altre attività
Velocità caratt. di crescita dell'incendio $t_e$	150 s ( <i>fast</i> )	75 s ( <i>ultra-fast</i> )
RHR <sub>max</sub> totale	5 Mw	50 Mw
RHR <sub>max</sub> per m <sup>2</sup> di superficie del focolare	250-500 kw/m <sup>2</sup> [1]	500-1000 kw/m <sup>2</sup> [1]
Resa in particolato Y <sub>soot</sub>	Pre flashover: 0,07 kg/kg [2,3] Post flashover: 0,14 kg/kg [2,3]	Pre flashover: 0,18 kg/kg [4] Post flashover: 0,36 kg/kg [4]
Resa in monossido di carbonio Y <sub>CO</sub>	Pre flashover: 0,10 kg/kg [5] Post flashover: 0,40 kg/kg [5]	
Calore di combustione effettivo $\Delta H_c$	20 MJ/kg [3]	
Resa in biossido di carbonio Y <sub>CO2</sub>	1,5 kg/kg [3,6]	
Resa in acqua Y <sub>H2O</sub>	0,82 kg/kg [3,6]	
Frazione di RHR(t) in irraggiamento (Radiative fraction)	35% [3]	

[1] Da impiegare in alternativa all'RHR<sub>max</sub> totale, considerando la massima superficie del focolare, pari al compartimento antincendio nel caso di carico di incendio uniformemente distribuito, ma che può essere un valore inferiore nel caso d'incendio localizzato.

[2] Robbins A P, wade C A, Study Report No.185 "Soot Yield Values for Modelling Purposes - Residential Occupancies", BRANZ, 2008

[3] "C/VM2 Verification method: Framework for fire safety design", New Zealand Building Code

[4] "SFPE handbook of fire protection engineering", NFPA, 4<sup>th</sup> ed., 2008. Tabella 3-4.16, pag. 3-142, da polyurethane flexible foams.

[5] Stec A A, Hull T R, "Fire Toxicity", woodhead Pub., 2010. § 2.4 con cD = 1,25 (*underventilated fire*)

[6] In alternativa alle rese Y<sub>CO2</sub> e Y<sub>H2O</sub>, si può imporre nel codice di calcolo il combustibile generico CH<sub>2</sub>O<sub>0,5</sub>.

Figura 5-80 – Tabella M.2.2 del DM 03/08/2015

Per edifici industriali sono forniti i seguenti parametri per poter definire un cosiddetto “focolare predefinito”, ovvero una curva  $t^2$ , così modellata:

- $t_{[1MW]} = 75s$ ;
- $RHR_f = 500 \div 1000 \text{ kW/m}^2$ .

Tali valori di normativa devono garantire il progettista della sicurezza incendio, configurando uno scenario limite che ha poche probabilità di essere superato durante tutta la vita dell'attività.

Uno degli obiettivi di tale lavoro, è stato appunto testare con un hangar ad uso magazzino tali metodi normativi, utilizzando come benchmark di riferimento degli approcci più avanzati.

Per entrambi gli scenari considerati sono stati effettuati confronti tra il “focolare predefinito” di normativa per edifici industriali e le curve RHR calcolate come in 5.3, tali confronti hanno riguardato in particolare i seguenti parametri:

- picchi di potenza (‘peak value’) delle RHR;
- tempo totale dell’incendio;
- temperature calcolate con modelli a zona.

Con i parametri indicati dalla normativa per edifici industriali (Figura 5-81) si raggiungono picchi di potenza di circa 55 [MW] con un tempo di incendio superiore ai 120 min. Utilizzando l’approccio ingegneristico, in realtà le potenze sono più elevate (200 [MW]), e sarebbero eguagliate, nello specifico, solo da quei focolari con il parametro  $RHR_f$  pari a 3000 [kW/m<sup>2</sup>].

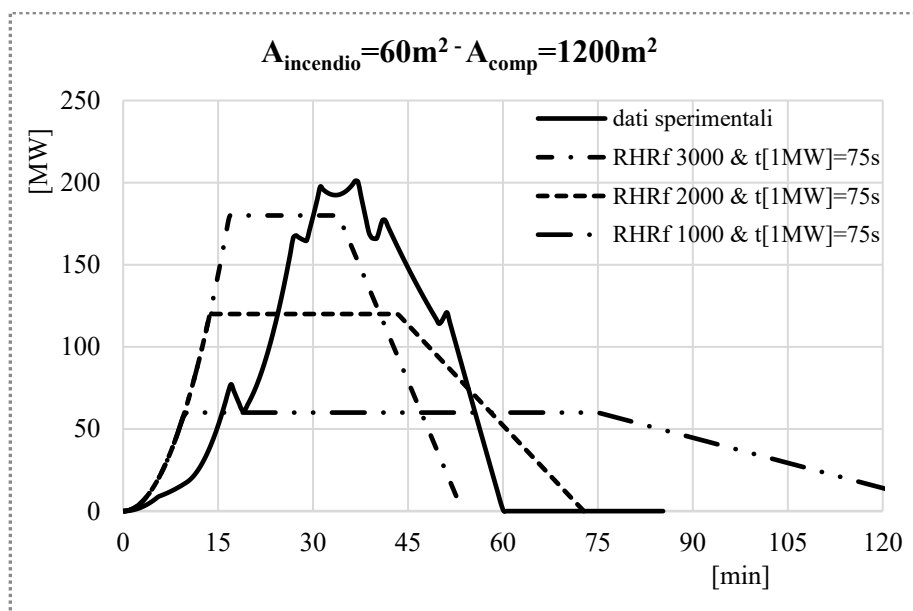


Figura 5-81 – scenario 1 confronto RHR tra normativa e approccio ingegneristico

Come mostrato nei risultati in (Figura 5-81), l’approccio ingegneristico per lo Scenario 1 garantisce livelli di sicurezza maggiori rispetto alle indicazioni di normativa, in quanto la potenza massima è circa 4 volte maggiore dei 50 MW

indicati come valore massimo dalla tabella di normativa (tab M.2.2 del DM 03/08/2015).

Nella Figura 5-82 sono mostrate le curve di potenza nel caso dello scenario 2. In questo caso le indicazioni di normativa risultano essere a vantaggio di sicurezza: il valore di RHRf corrispondente alle curve sperimentali risulta essere di circa  $150 \text{ kW/m}^2$ . Mentre il valore minimo di normativa ( $\text{RHRf}=500 \text{ kW/m}^2$ ) genera una curva con un picco di 200 MW.

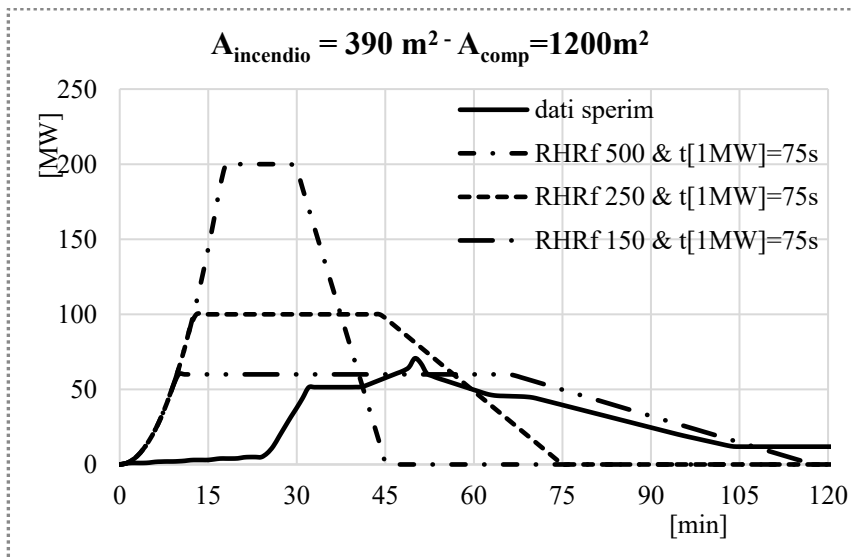


Figura 5-82 – scenario 2 confronto RHR tra normativa e approccio ingegneristico

Le differenze mostrate nei due scenari con gli approcci normativi sono in parte dovute alla concentrazione in pianta dei carichi di incendio, molto concentrati i carichi dello scenario 1 (par. Figura 5-22), molto distribuiti per lo scenario 2 (Figura 5-23). Per carichi molto concentrati e di valore assoluto di potenza molto alto, la formulazione di normativa non risulta fornire risultati che maggiorano i peggiori scenari analizzati. Questo aspetto merita approfondimento, in quanto negli edifici industriali tali condizioni di carico sono frequenti.

Le curve composte di Figura 5-81 sono state utilizzate con i programmi Ozone e CFAST (con i parametri indicati nel par. 4.1.1) per ottenere delle curve naturali di incendio, e comprendere gli effetti in termini di temperatura.

I risultati delle temperature mostrano lo stesso andamento delle curve di potenza; infatti l'incendio è controllato dal combustibile.

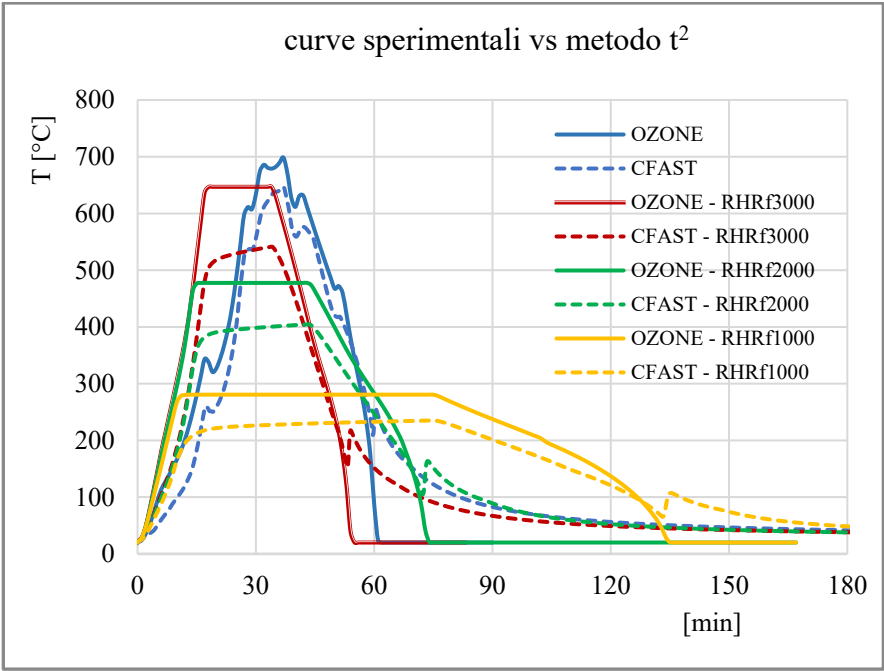


Figura 5-83 – scenario 1 confronto temperature tra focolare di incendio di normativa e approccio ingegneristico

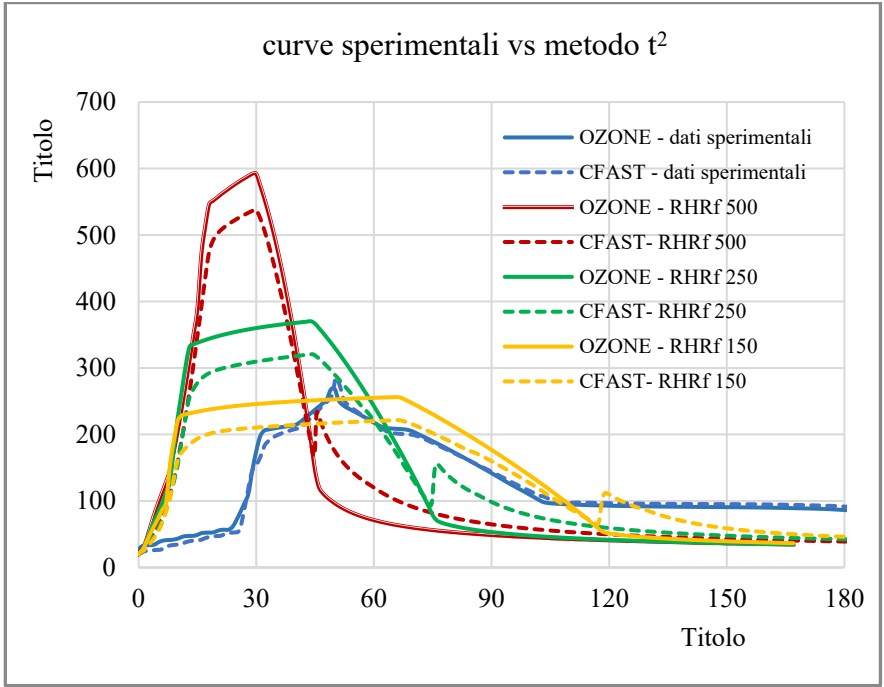


Figura 5-84 – scenario 2 confronto temperature tra focolare di incendio di normativa e approccio ingegneristico



I valori indicati per edifici industriali nella tabella M.2.2 delle nuove norme tecniche di prevenzione incendi (2) di  $RHR_f = [500\div 1000]$  kW/mq hanno mostrato, nella fattispecie, dei limiti. Le indicazioni normative si sono rivelate molto a vantaggio di sicurezza per lo scenario 2, e poco vantaggiose nello scenario 1, pur essendo i carichi di incendio di valore simile (5.3).

Il calcolo delle temperature negli ambienti, inoltre, ha permesso il confronto con la curva ISO834 (6), la quale migliora le temperature in tutti i casi (Figura 5-38 e Figura 5-39).

### 5.9.2 Prestazioni della struttura sottoposta ad incendio

Come già sottolineato in precedenza, non esistono in Italia regole tecniche verticali per edifici industriali ed hangar. Questo aspetto costituisce un limite all'applicazione di norme prescrittive di facile ed immediata esecuzione. E' quindi concreta la possibilità di utilizzare anche approcci di tipo ingegneristico. Uno degli obiettivi di questo lavoro di tesi consiste proprio nel comprendere l'efficacia di tali approcci per la valutazione della sicurezza strutturale antincendio della tipologia di edifici analizzata.

L'efficacia dei differenti approcci è stata misurata confrontando i livelli di sicurezza raggiunti utilizzando i metodi proposti dalla normativa, sia soluzioni basate su modelli semplici (definite dalla norma 'conformi'), sia soluzioni basate su modelli avanzati (rientranti nella categoria normativa di soluzioni 'alternative' o 'in deroga').

In questo capitolo è stata esaminata la tipologia di hangar ad uso magazzino. La valutazione del carico di incendio è avvenuta attraverso il monitoraggio dei registri dei materiali di carico/scarico, su un periodo di circa 10 anni. Di questi 10 anni si è preso il trimestre caratterizzato dai carichi di incendio più gravosi. Nel caso non sia possibile conoscere i carichi reali, sono in alternativa utilizzabili le indicazioni contenute nel DM 03/08/2015 al pt. S.2.9.1 – (Indicazioni aggiuntive sulla determinazione statistica del carico di incendio). La norma

propone dei coefficienti amplificativi del carico di incendio rilevato, quando vi sia una certa variabilità dello stesso.

Le modalità di accatastamento e deposito dei materiali nell'attività hanno inciso nella determinazione degli scenari.

Sono stati valutati due scenari:

- Scenario 1: materiali combustibili occupanti una ridotta area in pianta ( $A_i/A_{comp}=6\%$ ) e con carico specifico di incendio di  $294 \text{ MJ/m}^2$  (Tabella 5-3 – Carichi di incendio Scenario 1), e pari a  $5.900 \text{ MJ/m}^2$  con riferimento all'area effettivamente occupata dagli stessi materiali;
- Scenario 2: materiali occupanti buona parte dell'area in pianta ( $A_i/A_{comp}=40\%$ ), con carico specifico di incendio pari a  $254 \text{ MJ/m}^2$ , valutato sull'area del compartimento (Tabella 5-4 – Carichi di incendio Scenario 2).

I portali di ingresso dell'hangar chiusi hanno determinato temperature maggiori rispetto a configurazioni con portali aperti. In realtà l'effetto è più marcato con i modelli a zona, rispetto al modello avanzato realizzato con FDS.

Il modello FDS ha permesso di valutare l'effetto dell'apertura delle finestre ad un'assegnata temperatura ( $120^\circ\text{C}$ ). La chiusura iniziale delle finestre, nella fattispecie, ha influenzato poco sia le temperature massime sia il loro andamento nel tempo; infatti dopo pochi minuti dall'inizio dell'incendio le finestre risultano quasi tutte aperte.

E' stata valutata la capacità di resistenza al fuoco della struttura sia con riferimento ad elementi strutturali non protetti che protetti mediante l'applicazione di uno strato di vernice intumescente sugli elementi, dello spessore di  $1200 \mu\text{m}$ .

Le analisi termo-strutturali avanzate hanno riguardato l'applicazione di campi termici di curve convenzionali e curve naturali, su elementi protetti e non protetti. L'analisi termo-strutturale avanzata con riferimento alla curva ISO834 è stata studiata per valutare le soluzioni conformi di resistenza al fuoco. Infatti utilizzando le 'soluzioni conformi' previste da normativa (2), è obbligatorio l'uso di curve ISO834 (6).

I risultati in Tabella 5-5 sintetizzano quanto emerge dalle analisi effettuate su questa tipologia di edificio industriale.

*Tabella 5-5 – Riepilogo dei valori di tempo massimo di resistenza al fuoco della struttura in caso di elementi non protetti o protetti con vernici intumescenti*

<div>ESPOSIZIONE</div> <div>CURVA INCENDIO</div>	STRUTTURA NON PROTETTA	PROTEZIONE EL. PRINCIPALI	STRUTTURA PROTETTA
ISO834	t = 5 min	t = 20 min	t = 40 min
CURVA NATURALE Scenario 01 ( $A_i=60m^2$ )	t = 7 min	t = 20 min *	t = 20 min *
CURVA NATURALE Scenario 02 ( $A_i=390 m^2$ )	t = 12 min	$R_{d,\theta} > E_{d,\theta}$ per l'intera durata di incendio	$R_{d,\theta} > E_{d,\theta}$ per l'intera durata di incendio

\*le temperature raggiungono valori  $T > 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  dopo i 20 minuti

Le analisi effettuate con la curva ISO834, su struttura non protetta, confermano quanto indicato dalle semplici verifiche per singoli elementi effettuate con il nomogramma: la resistenza strutturale nel dominio del tempo non supera i 15 minuti.

Le analisi termo-meccaniche effettuate con curve naturali di incendio e struttura non protetta mettono in risalto basse capacità di resistenza all'incendio, considerato che dopo alcuni minuti la struttura raggiunge la crisi per tutte le curve di incendio analizzate. Va sottolineato come lo Scenario 1, caratterizzato da una forte concentrazione del carico specifico di incendio in alcune zone, risulta più severo dello Scenario 2, a causa delle elevate temperature raggiunte negli elementi strutturali vicini ai carichi di incendio.

Sono state, quindi, effettuate analisi strutturali avanzate tenendo conto della applicazione di uno strato di  $1200\text{ }\mu\text{m}$  di vernici intumescenti. Applicando la curva ISO834 alla struttura protetta, subentrano crisi strutturali dopo circa 40 minuti dall'inizio dell'incendio. Applicando la curva dello scenario 1, le temperature nell'ambiente superano i  $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$  già attorno ai 20 minuti: questo aspetto può essere critico per la tenuta delle vernici intumescenti, le quali

potrebbero esporre i profili metallici alla loro temperatura critica in un tempo ragionevolmente molto breve, dati i ridotti spessori dei profili.

Le analisi termo-meccaniche con curva di incendio derivante dallo scenario 2 e struttura protetta non evidenziano crisi strutturali per l'intera durata dell'incendio, per cui la struttura segue anche la fase di raffreddamento.

Effettuando back-analysis sui modelli strutturali non protetti e completamente protetti, sono stati individuati gli elementi che raggiungono la crisi, o che sono molto sollecitati nel caso di struttura protetta. Tali elementi sono le sezioni componenti il corrente superiore, quello inferiore, ed altri elementi diagonali compressi che trasmettono gli sforzi dalla trave orizzontale in fondazione.

Le analisi termo-meccaniche, quindi, in questa seconda fase hanno riguardato la protezione della struttura limitata solo agli elementi descritti. Sono state applicate sia curve di incendio standard (ISO834), sia curve di incendi naturali.

La struttura parzialmente protetta con curva ISO834 ha un collasso strutturale dopo circa 20 minuti, dovuto all'insabibilizzazione di diagonali che trasmettono le sollecitazioni della trave orizzontale agli elementi verticali. Il tempo di 20 minuti risulta inferiore al tempo di resistenza di 40 minuti, ottenuto con struttura interamente protetta e curva di incendio ISO834, ma ben superiore al tempo di 5 minuti, ottenuto con struttura non protetta e curva di incendio ISO834.

Il comportamento di tale scelta progettuale è stato indagato, in prima analisi, per valutare l'efficiacia, o meno, della strategia di protezione parziale adottata.

La struttura parzialmente protetta è stata esposta a curva di incendio naturale derivante dallo Scenario 2 (distribuiti). L'analisi termo-meccanica non rileva collassi per l'intera durata dell'incendio, tuttavia è presente un moderato livello di danneggiamento, poichè uno dei correnti superiori si instabilizza. Questo comportamento è confermato sia dal campo spostamenti restituito dal post-processore di SAFIR (il programma Diamond), sia dalle verifiche di resistenza nel dominio del tempo fatte con il programma creato con questo lavoro di tesi.

Dato che con lo Scenario 2 la struttura parzialmente protetta risulta avere livelli adeguati, è risultato utile comprendere se ci fossero delle strategie antincendio che rendessero lo scenario localizzato (Scenario 1) poco probabile; infatti lo Scenario 1 presenta un grado di danneggiamento molto alto per le strutture.

Tale strategia di mitigazione del rischio è attuabile intervenendo sulle modalità di stoccaggio, in modo da rendere molto minori le probabilità di concentrazione dei carichi di incendio. Tale approccio è codificato dalla norma, che specifica come le misure di sicurezza incendio costituiscano un vincolo per l'attività (cfr. comma 8 del pt. S.2.6 DM.Int.03/08/2015- Verifica delle prestazioni di resistenza al fuoco con curve naturali di incendio).

L'indicazione di distribuire in maniera più uniforme in pianta il materiale stoccato configura lo Scenario 2 come lo scenario di riferimento per gli edifici in oggetto.

In Tabella 5-6 sono mostrati i livelli di prestazione raggiunti combinando gli scenari, con le curve di incendio e le protezioni applicate.

*Tabella 5-6 – Classe minima di resistenza richiesta dalla normativa*

TIPOLOGIA DI PROTEZIONE	CURVA DI INCENDIO	SCENARIO 1 (localizzati)		SCENARIO 2 (distribuiti)	
		CLASSE MINIMA DI RESISTENZA	VERIFICA LIVELLO	CLASSE MINIMA DI RESISTENZA	VERIFICA LIVELLO
NON PROTETTA	ISO834	liv II: 240 min	<i>NO</i> ( $t_f=5$ min)	liv II: 60 min	<i>NO</i> ( $t_f=5$ min)
	curve di incendio naturali	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	<i>NO</i> ( $t_f=7$ min)	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	<i>NO</i> ( $t_f=12$ min)
PROTEZIONE ELEMENTI SELEZIONATI	ISO834	liv II: 240 min	<i>NO</i> ( $t_f=20$ min)	liv II: 60 min	<i>NO</i> ( $t_f=20$ min)
	curve di incendio naturali	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	*	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	<b>SI (LIV III)</b>
PROTEZIONE TOTALE	ISO834	liv II: 240 min	<i>NO</i> ( $t_f=40$ min)	liv II: 60 min	( $t_f=40$ min)
	curve di incendio naturali	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	*	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	<b>SI (LIV III)</b>

Il livello di resistenza raggiungibile nello Scenario 2 (carichi distribuiti) e curva ISO834, è di R30, contro una richiesta minima di R60.

Utilizzando curve convenzionali di incendio con analisi strutturali avanzate, anche con struttura protetta non si riesce ad ottenere livelli di resistenza apprezzabili.

L'attività di rilievo dei carichi, e la modellazione dell'incendio, attraverso analisi con modelli termo-fluidodinamici avanzati, consente di conoscere i campi di temperatura all'interno dell'ambiente, e di capire quanto duri l'incendio, e a che tempo comincia la fase di raffreddamento. Utilizzando quindi modelli termo-meccanici 3D si ottiene il reale degrado delle resistenze con la temperatura (e quindi con il tempo di incendio) e le sollecitazioni nate per effetti termici (sollecitazioni variabili con il tempo). Questa base di dati consistente, ha richiesto uno stato di conoscenza ed un grado di approfondimento maggiori rispetto all'utilizzo di curve convenzionali. I risultati, tuttavia, sono da porre in rilievo, poiché, nonostante per questo tipo di attività sia richiesto il livello II, con tali approcci la struttura si dimostra capace di non raggiungere la crisi per l'intero sviluppo dell'incendio: tale prestazione è conforme al livello di resistenza superiore al II, ovvero il livello III.

Giova ripetere come il livello III sia ottenuto con l'applicazione delle vernici intumescenti solo su una parte della struttura, con un risparmio di costi di intervento.

I primi 3 livelli di prestazione di resistenza al fuoco riguardano verifiche di resistenza strutturale.

I livelli IV e V sono raggiungibili verificando alcuni parametri di danneggiamento della struttura, essi sono stati pensati per edifici strategici o di importanza rilevante, per tutelare l'edificio o i beni all'interno di esso.

Per soluzioni 'alternative' o 'in deroga' tali valori sono stabiliti in base alle specifiche della committenza e del progettista, poiché potrebbero riferirsi ad alcune funzionalità dell'edificio che si vuole salvaguardare anche in caso di incendio.

Per soluzioni conformi si fa riferimento alla Tabella 5-7.

Tabella 5-7 – Limiti di deformabilità per ‘soluzioni conformi’  
livello di prestazione IV (DM.Int.03/08/2015) (2)

tipologia strutturale	parametro di controllo	valore limite
travi e solai	$\delta_{v,max}/L$	1/100
piastre	$\delta_{v,max}/L$	1/100
el.verticali	$\delta_{h,max}/H$	1/100

I valori di spostamento di abbassamento in mezzeria (Figura 5-85) e spostamento laterale massimo (Figura 5-88) forniscono valori massimi considerati accettabili, considerato che:

- i valori di spostamento massimo considerati sono quelli relativi a soluzioni conformi, nonostante gli approcci con curve di incendio naturali siano delle ‘soluzioni alternative’;
- i valori massimi ammessi sono gli stessi per tutti i materiali da costruzione, risultando evidente che l’acciaio ha una maggiore deformabilità.

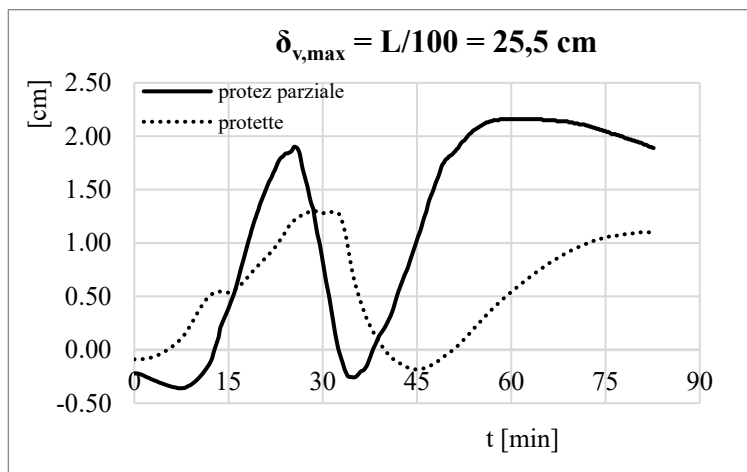


Figura 5-85 – Scenario 2, incendio naturale, abbassamento in mezzeria

I valori di spostamento in mezzeria hanno 2 punti di massimo: questo comportamento non sorprende, dato che le zone di incendio nelle quali è stata

suddivisa la struttura hanno picchi temperatura in tempi differenti (i grafici di temperatura per questo scenario sono riportati in Figura 5-46).

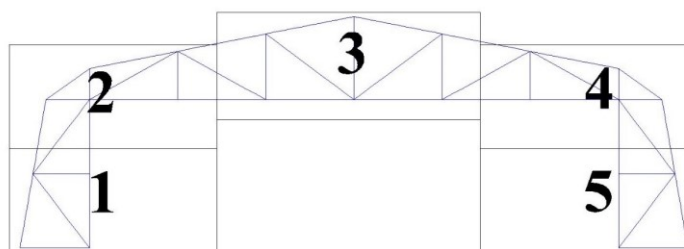


Figura 5-86 – Zone caratterizzate da temperature differenti (calcolate con FDS)

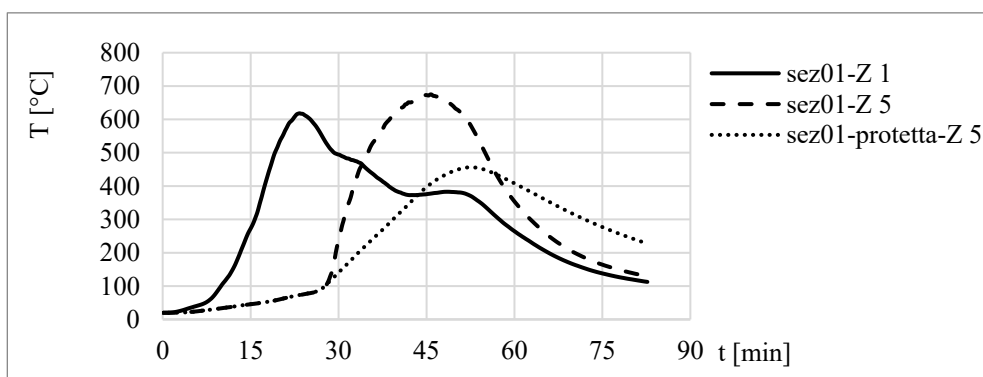


Figura 5-87 – Confronto temperature sezione zona1 vs zona5 (protetta e non protetta)

Nello Scenario 2 la struttura comincia ad essere riscaldata nella parte sinistra, e ad avere dilatazioni termiche consistenti, in corrispondenza dell'innesco, l'incendio procede quindi verso la zona destra, mentre a sinistra è iniziata una fase di raffreddamento.

Il confronto tra le temperature della stessa sezione, posta a sinistra, zona 1, e a destra, zona 5, (Figura 5-87) mostra due picchi che rendono evidente il comportamento rilevato (Figura 5-85).



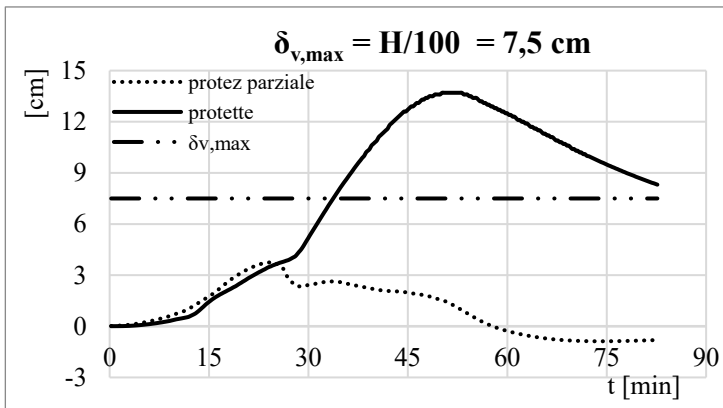


Figura 5-88 – Scenario 2, incendio naturale, spostamento laterale

I valori di Figura 5-88 mostrano come lo spostamento laterale sia maggiore nel caso di struttura interamente protetta, questo aspetto, approfondito nel paragrafo relativo alle analisi, è dovuto al raggiungimento della situazione di instabilità del corrente superiore nel caso di protezione parziale (par. 5.8.3). Tale instabilità provoca una riduzione degli spostamenti verso l'esterno venendo a mancare parte della spinta di dilatazione termica.

I valori residui nei diagrammi di spostamento dipendono dal grado di danneggiamento verificatosi sulla struttura. Alcune sezioni hanno ceduto per sforzo di compressione assiale, tuttavia non hanno causato un collasso strutturale, permettendo alla struttura di raffreddarsi, aspetto approfondito nei par. 5.8.3 e 5.8.3.

I risultati ottenuti mostrano come l'applicazione del metodo ingegneristico, raggiunga caratteristiche di efficacia (raggiungimento dei livelli di prestazione richiesti) ed efficienza (attraverso l'applicazione delle vernici riservata solo ad elementi critici).

Concludendo, i livelli di prestazione più alti sulla struttura sono stati ottenuti attraverso la combinazione di più aspetti:

- prescrizione sull'attività di stoccaggio affinché gli scenari di incendio di riferimento siano quelli con carichi d'incendio distribuiti (Scenario 2);
- applicazione di strati di protezione di vernice intumescente di 1200  $\mu\text{m}$ ;
- utilizzo di modellazioni termo-fluidodinamiche avanzate (FDS (7));
- utilizzo di modelli termo-meccanici avanzati (SAFIR (14))

## **6 Hangar metallico ad uso Aviorimessa**

La seconda struttura oggetto di approfondimento di questo lavoro è un hangar metallico con uso aviorimessa. Esso è in dotazione all'Aeronautica militare Italiana, impiegato per il ricovero dei velivoli ATR-72, presso l'aeroporto militare di Catania (località Sigonella).

Il progetto della struttura risale al 2005. La struttura è composta da una copertura metallica poggiante su pilastri in c.a.. Non risultano eseguiti interventi post-operam, ad esclusione di quelli di manutenzione ordinaria.

### **6.1 Descrizione strutturale dell'hangar**

La struttura di copertura metallica è formata da due piastre ortotrope poggianti su 6 pilastri in c.a..

Ogni piastra è caratterizzata da una doppia orditura di capriate reticolari, con travi secondarie poggiate su travi principali, in corrispondenza dei pilastri.

Alcuni stralci del progetto dell'hangar sono stati riportati in Figura 6-2, Figura 6-3 e Figura 6-4.

Lo schema strutturale 'a doppia piastra' è ricorrente nei recenti hangar di cui si è dotata l'Aeronautica Militare Italiana.

I due parametri fondamentali della struttura che caratterizzano le classi di velivoli utilizzabili all'interno sono:

- la luce libera delle travi porta-portali;
- l'altezza massima dell'intradosso della piastra metallica.

L'hangar ha subito un cambio di destinazione d'uso, in seguito all'avvicendamento dei velivoli impiegati presso lo stormo. Ai fini esclusivi di uso aviorimessa, l'hangar è stato valutato idoneo ad accogliere il nuovo velivolo, soprattutto perchè il nuovo velivolo ha dimensioni inferiori.

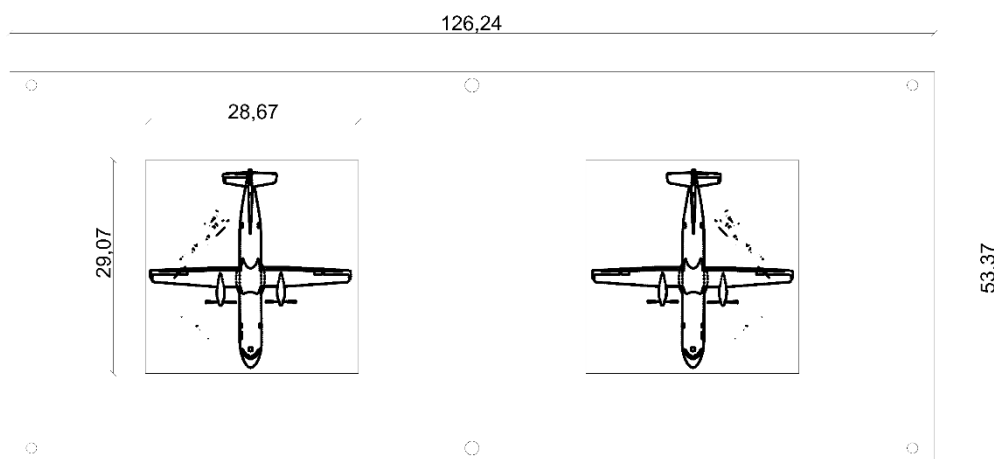


Figura 6-1 – Hangar aviorimessa: principali dimensioni di ingombro in pianta

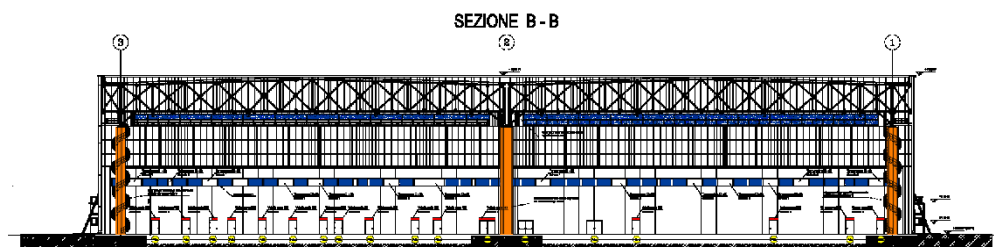


Figura 6-2 – Hangar aviorimessa: sezione in corrispondenza dei pilastri

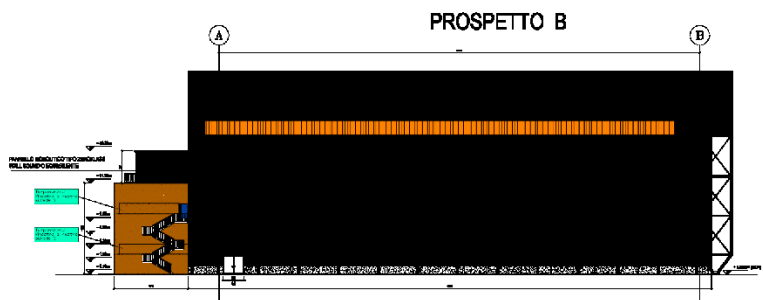


Figura 6-3 – Hangar aviorimessa: prospetto EST

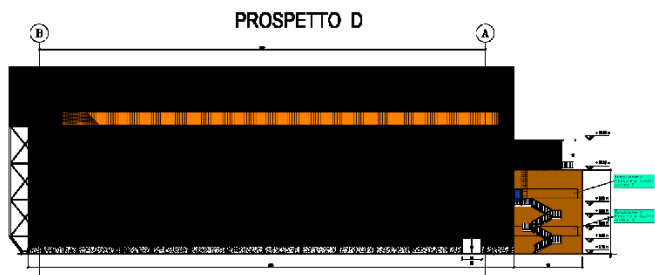


Figura 6-4 – Hangar aviorimessa: prospetto EST

La destinazione d’uso originaria dell’hangar per il velivolo Atlantique (46). Velivolo di origine francese di cui si riportano i dati in Figura 6-5.



Lunghezza	31,75 m
Apertura alare	36,30 m
Altezza	11,33 m
Superficie alare	120,34 m <sup>2</sup>
Peso a vuoto	23.500 kg
Peso carico	26 000 kg
Peso max al decollo	46 000 kg

Figura 6-5- Velivolo utilizzato in passato - Breguet Br 1150 Atlantic

A seguito dell’adozione di differenti configurazioni e sistemi d’arma, il velivolo Atlantique è stato sostituito dal più moderno ATR 72 (Figura 6-6).

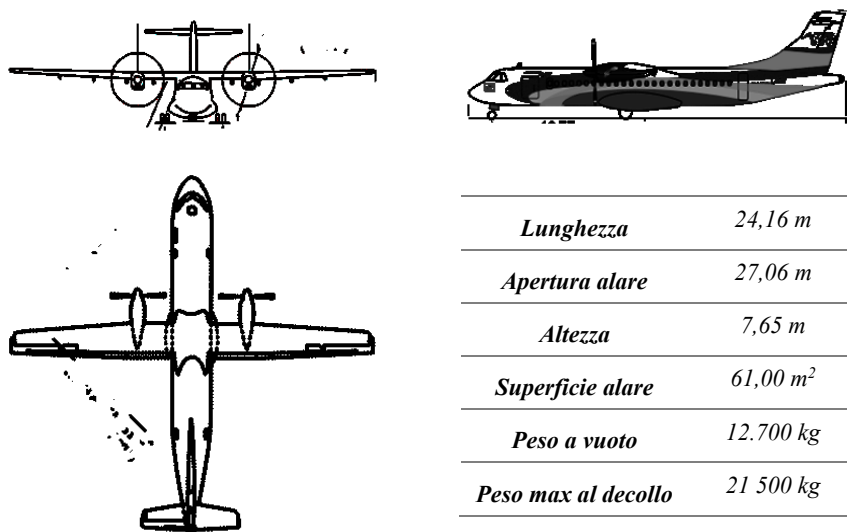


Figura 6-6- Velivolo attualmente in dotazione presso l'hangar: ATR-72MP



Figura 6-7- Velivolo ATR-72MP con funzioni di pattugliamento marittimo

Le configurazioni con le quali i velivoli sono riposti in hangar non prevedono, di norma, il cosiddetto ‘hangaraggio’ a pieno carico carburante, tuttavia per massimizzare il rischio incendio, si è scelto di non escludere *a priori* questo accadimento.

Il velivolo precedentemente utilizzato (Atlantique) ha una capacità di pieno carburante di 50.000 kg, contro i circa 5.000 kg dell'ATR72.

## **6.2 Rilievo dei carichi di incendio tramite dati sperimentali e metodi di letteratura**

I velivoli di recente fabbricazione fanno largo impiego di materiali compositi. Tali materiali a temperature comprese tra i 100 e 200 °C cominciano già ad emettere fumi e gas nocivi derivanti dalla loro particolare composizione chimica. Sono molti gli studi sulla capacità di reazione al fuoco dei materiali per uso avionico. In caso di incendio durante il volo i materiali compositi di uso strutturale, già a basse temperature possono compromettere le capacità di resistenza e rigidità strutturale.

La versione consegnata all'Aeronautica Militare Italiana non possiede i sedili passeggeri. Tali sedili infatti avrebbero rappresentato un carico di incendio consistente, visto che tipicamente i sedili per passeggeri di velivoli pesano mediamente 15 kg l'uno ed essendo realizzati in materiale di poliuretano, hanno un potere calorifico molto alto (47).

Per i motivi esposti si ritiene che il maggiore e più immediato rischio di incendio derivi dal carburante utilizzato dal velivolo.

Il velivolo in stazionamento viene sempre privato in sicurezza del carburante presente.

Al fine di massimizzare gli effetti dell'incendio, è stato scelto di considerare la quantità di totale carburante pari a 5.000kg. Si è operato comunque un confronto con alcuni studi sui carichi di incendio degli aeromobili per area di impronta, lavori presentati presso il COST – European Cooperation in Science and Technology nella sezione IFER Integrated Fire Engineering and Response (48). Il potere di rilascio termico dei carburanti, insieme ad altri parametri utili, è disponibile per le comuni e più diffuse tipologie di carburanti (49):

*Tabella 6-1 – Costanti termochimiche dei carburanti di maggiore diffusione*

		Benzina	JP4	Diesel	Olio per trazione
p.s.	[kg/m <sup>3</sup> ]	740	760	940	760
$\Delta h_c$	[MJ/kg]	43.7	43.5	39.7	46.4
$m''_\infty$	[kg m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> ]	0.055	0.051	0.035	0.039
$\kappa\beta$	[m <sup>-1</sup> ]	2.1	3.6	1.7	0.7

Il velivolo utilizza carburante JP4, pertanto il carico di incendio totale considerato è di:

$$q_{\text{tot}} = 5.000 \text{ kg} \times 43,5 \text{ MJ/kg} = 217.500 \text{ MJ}$$

Visto che l'area dell'intero compartimento è di circa 7400 mq, il carico di incendio specifico risulta:

$$q_s = 217.500 \text{ MJ} / 7.400 \text{ mq} \approx 30 \text{ MJ} / \text{mq}$$

Tale valore di carico è molto basso, e non tiene conto della localizzazione dell'aeroplano all'interno dell'hangar, poiché la sua posizione è sempre centrale, condizionata dall'apertura alare e dalla lunghezza del velivolo.

## **6.3 Scenari di incendio e curve di rilascio termico**

La sicurezza nei confronti del rischio di incendio in un hangar ad uso aviorimessa non può limitarsi in generale limitarsi alle sole misure di protezione passiva. Infatti il valore del bene contenuto nell'hangar, nello specifico il velivolo militare ATR72MP, è maggiore, di molto, del valore stesso dell'hangar.

La migliore strategia per mitigare il rischio di incendio è rappresentata dal coniugare le misure di protezione passiva con la riduzione del pericolo di innesco e di propagazione, adottando anche misure rispettivamente di prevenzione e di protezione attiva (impianti di spegnimento automatico, etc.). Non ci si sofferma

sulle procedure di manutenzione dell'aeromobile, che si è avuto modo di verificare, implementano misure idonee e personale qualificato al fine di rendere poco probabile l'innesco.

Questo lavoro si concentra sulla protezione passiva, assunto che l'hangar oggetto di studio non presenta al momento dispositivi particolari di protezione attiva.

Qualora si avesse la certezza che il velivolo entra in hangar sempre con serbatoio vuoto, allora i carichi di incendio e i tipi di materiale reagenti al fuoco costituirebbero un rischio di incendio molto minore, e le valutazioni degli scenari di incendio sarebbero differenti.

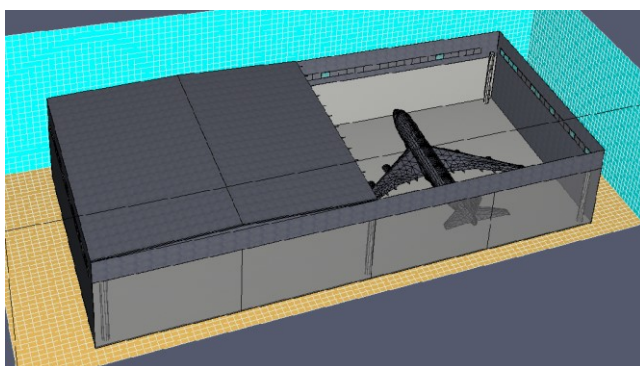


Figura 6-8 – Vista di modello in 3d dall'alto dell'hangar aviorimessa

Questo tipo di approccio è sposato in pieno dalla normativa prescrittiva NFPA 409 dedicata agli hangar aviorimessa, che adotta, infatti, il principio “*no fuel no foam*”. La struttura della normativa citata è illustrata nel par. 2.3..

Considerata la bassa reazione al fuoco dei materiali componenti il velivolo, e la notevole capacità dei serbatoi, si è preso come scenario di riferimento quello nel quale ci sia stata una perdita completa di tutto il carburante contenuto nei serbatoi del singolo velivolo.

Tale perdita in realtà andrebbe considerata solo in parte, in quanto sono presenti più serbatoi ed anche sistemi di accumulo nella pavimentazione, destinati allo scopo. Tuttavia al fine di massimizzare il rischio di incendio, è stato considerato tutto il carburante come partecipante.

Uno degli aspetti di rilievo di questo scenario sono la velocità e il picco di potenza della RHR associata al JP4.



I carburanti sono molto studiati nell'ingegneria dell'incendio, sotto la ricorrente espressione anglosassone 'pool fire' (50) e (24), questo a causa dell'elevata infiammabilità, dell'altissimo potere calorifico, e della velocità di combustione. In effetti ipotizzare che ci sia uno sversamento di carburante di circa 5.000 kg, equivale a creare una 'pool fire' sulla pavimentazione dell'hangar.

L'altezza dello strato di benzina che si accumula sulla pavimentazione dipende da alcuni fattori quali la viscosità iniziale (a temperatura ambiente) del carburante, la rugosità della pavimentazione ma soprattutto dalle pendenze della stessa.

Data la notevole variabilità del problema, sono state effettuate diverse simulazioni CFD con FDS, variando l'area occupata dal carburante per valutare gli effetti, ma non per simulare altri tipi di fenomeni legati alla tipologia di combustione dei carburanti.

Questo tipo di approccio si basa sui test sperimentali fatti sul rilascio termico dei carburanti. Dalla Tabella 6-1 – Costanti termochimiche dei carburanti di maggiore diffusione – è possibile ricavare un valore di RHR unitario per area del carburante esposta all'ambiente. Infatti il parametro  $m''_{\infty}$  indica la massa di carburante persa, espressa in kg su unità di area ogni secondo. Utilizzando il potere calorifico inferiore ( $\Delta h_c$ ) si ottiene un'espressione costante della potenza rilasciata nel tempo, dovuta alla reazione di combustione del JP4:

$$RHR(t) = \Delta h_c \left[ \frac{MJ}{kg} \right] \cdot m''_{\infty} \left[ \frac{kg}{m^2 \cdot s} \right] = 43,5 \cdot 0,051 = 2.218,00 \left[ \frac{kW}{m^2} \right]$$

Questo valore del picco di potenza per area unitaria, suggerisce quanto confermato nei test:

- la curva di rilascio ha un andamento costante nel tempo;
- il suo valore massimo, in assoluto, dipende dall'estensione della superficie del carburante a contatto con l'aria;
- la sua durata dipende, dunque, solo dalla quantità totale di carburante disponibile.

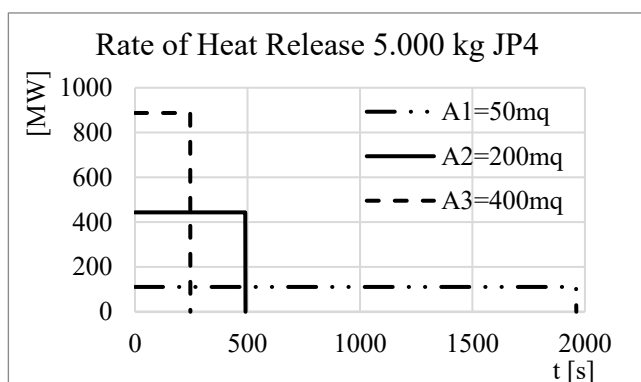


Figura 6-9 – Curve RHR del JP4 per differenti valori di superficie a contatto con l'aria

Quando la superficie a contatto con l'aria è ridotta i valori di potenza sono minori, rispetto a quando ci sono grandi superfici. La durata dell'incendio, invece, è inversamente proporzionale alla potenza massima.

Pertanto scegliendo come scenario di riferimento un'area di contatto bassa e bassi valori di potenza, in rapporto al volume e all'altezza dell'hangar, questi non genererebbero delle temperature molto alte. D'altra parte scegliere di utilizzare picchi molto altri vuol dire localizzare fortemente l'incendio, seppure a questo sarebbero associate durate di incendio dell'ordine di qualche minuto, come l'esempio in Figura 6-9 con  $A_3=400\text{mq}$   $t_{\text{max}}=245\text{ [s]}$  (4 min). Valori intermedi, in termini di area e durata dell'incendio, rappresentano un modo per massimizzare gli effetti dell'incendio sulle strutture, anche in virtù dei notevoli volumi ed altezze che caratterizzano l'hangar.

### 6.3.1 Curve di incendio naturali

La geometria del problema è condizionata dalle dimensioni dell'hangar e dalla localizzazione dei carichi di incendio. Le potenze massime sono molto alte, il che impedisce *de facto* l'adozione del modello semplificato di incendio localizzato proposto dall'Eurocodice (9) (metodo di Hasemi).

Sono stati utilizzati modelli termo-fluidodinamici avanzati per il calcolo delle temperature. Le metodologie di modellazione sono illustrate nel par. 1.

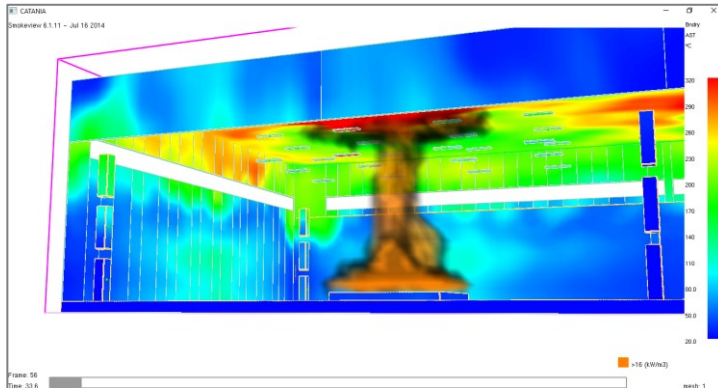


Figura 6-10 – Hangar aviorimessa: distribuzione delle temperature con AST (FDS + smokeview)

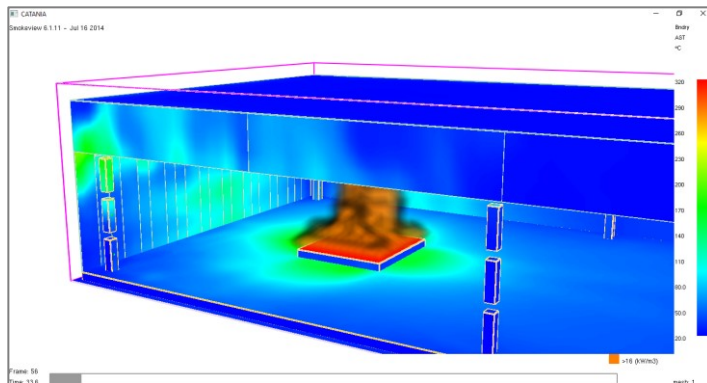


Figura 6-11 – Hangar aviorimessa: distribuzione delle temperature con AST (FDS + smokeview)

Le notevoli quantità di calore rilasciato (217.500MJ) fanno sì che anche le pareti più lontane dall'incendio abbiano temperature discrete (Figura 6-10 e Figura 6-11).

I sensori sono stati disposti seguendo le orditure delle travi della copertura, secondo l'ordine indicato in Figura 6-12. I valori segnati come “inferiori” fanno riferimento alla quota del corrente inferiore (20m), quelli superiori alla quota del corrente superiore (24m).

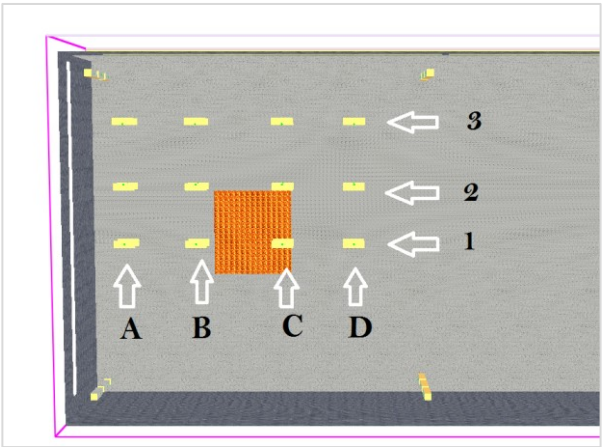


Figura 6-12 – Hangar aviorimessa, disposizione dei sensori AST (smokeview)

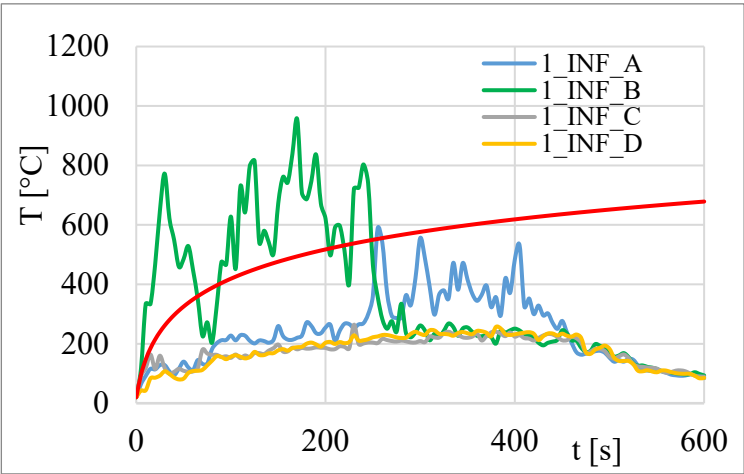


Figura 6-13 – Temperature capriata 1\_inferiore

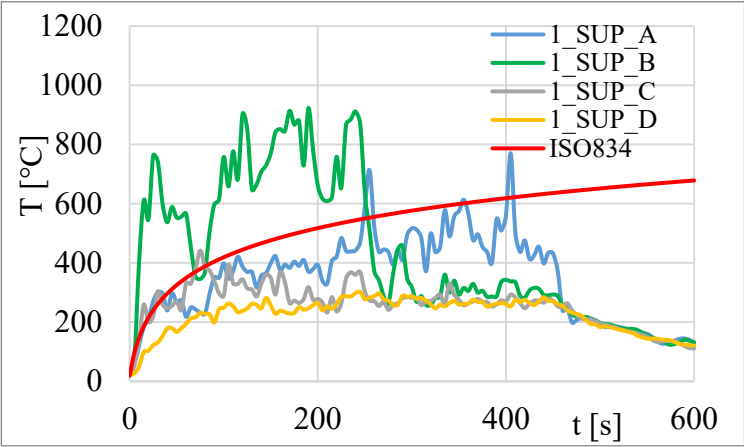


Figura 6-14 - Temperature capriata 1\_superiore

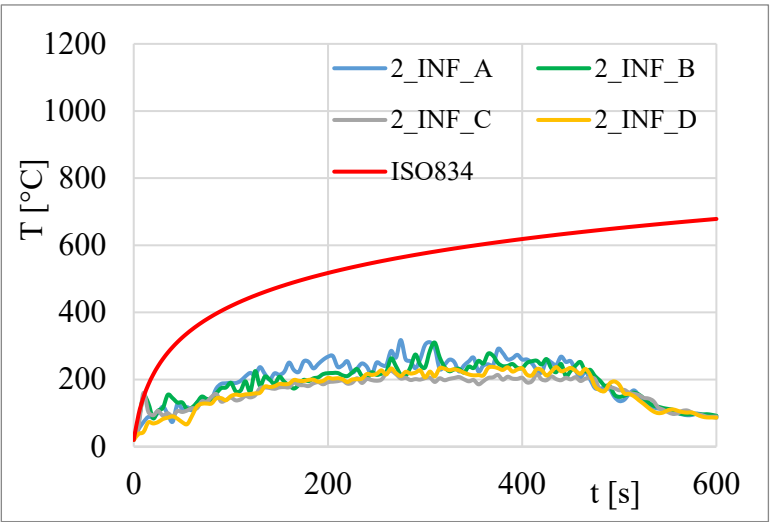


Figura 6-15 - Temperature capriata 2\_inferiore

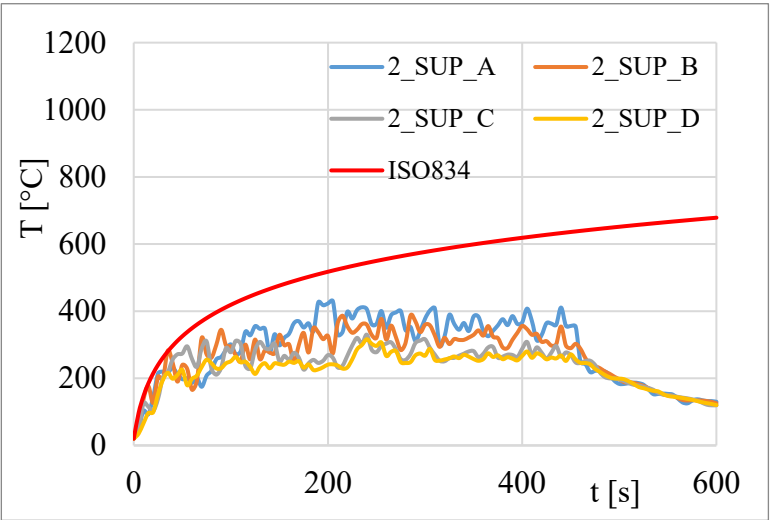
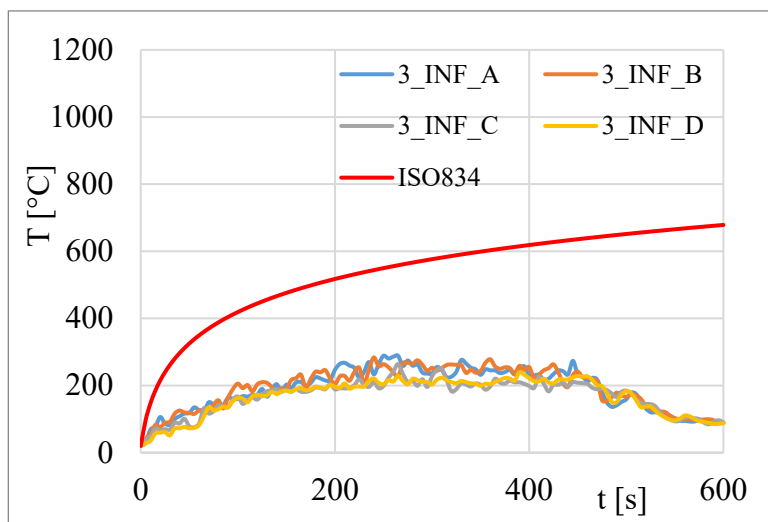
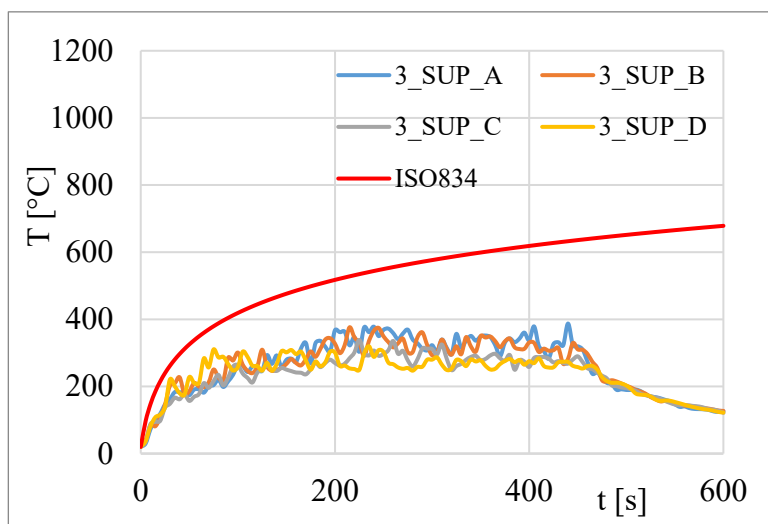


Figura 6-16 - Temperature capriata 2\_superiore

*Figura 6-17 - Temperature capriata 3\_inferiore**Figura 6-18 - Temperature capriata 3\_superiore*

Le temperature mostrate sono indicative di un'area di incendio specifica, coinvolta da un repentino aumento delle temperature, e di un'area più estesa coinvolta da temperature massime di 400 °C.

Il confronto, tra le temperature superiori ed inferiori delle capriate, evidenzia un notevole accumulo di calore nella parte superiore, con differenze massime di 200°C.

## 6.4 Analisi delle prestazioni di resistenza al fuoco

### 6.4.1 Livelli di prestazione di resistenza al fuoco e profili di rischio

Le analisi strutturali sono state condotte con metodi prescrittivi e prestazionali, operando un confronto tra gli approcci previsti da normativa (41) (2), alla luce dei livelli di prestazione di resistenza al fuoco richiesti per gli edifici industriali. L'attività di aviorimessa rientra tra le attività elencate nell'allegato 1 del DPR 151/2011. Tuttavia non vi sono regole tecniche verticali per questa specifica categoria di edifici industriali.

I livelli di prestazione di resistenza al fuoco richiesti dal DM 03/08/2015 sono i seguenti:

Livello di prestazione	Descrizione
I	Assenza di conseguenze esterne per collasso strutturale
II	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo sufficiente all'evacuazione degli occupanti in luogo sicuro all'esterno della costruzione.
III	Mantenimento dei requisiti di resistenza al fuoco per un periodo congruo con la durata dell'incendio.
IV	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, un limitato danneggiamento della costruzione.
V	Requisiti di resistenza al fuoco tali da garantire, dopo la fine dell'incendio, il mantenimento della totale funzionalità della costruzione stessa.

*Figura 6-19 – Livelli di prestazione per la resistenza al fuoco -  
Tabella S.2.1 del DM 03/08/2015 (2)*

La scelta di attribuzioni dei livelli è generalmente a cura del committente, anche se i criteri con i quali attribuirli devono essere coerenti con la tabella S.2.2 delle norme (Figura 5-49).

Livello di prestazione	Criteri di attribuzione
I	Opere da Costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti e strutturalmente separate da esse e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni ad altre opere da costruzione;</li> <li>• adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• non adibite ad attività che comportino presenza di occupanti, ad esclusione di quella occasionale e di breve durata di personale addetto.</li> </ul>
II	Opere da Costruzione o porzioni di opere da costruzione, comprensive di eventuali manufatti di servizio adiacenti nonché dei relativi impianti tecnologici di servizio, dove sono verificate <i>tutte</i> le seguenti condizioni: <ul style="list-style-type: none"> <li>• compartimentate rispetto ad altre opere da costruzione eventualmente adiacenti;</li> <li>• strutturalmente separate da altre opere da costruzione e tali che l'eventuale cedimento strutturale non arrechi danni alle stesse ovvero, in caso di assenza di separazione strutturale, tali che l'eventuale cedimento della porzione non arrechi danni al resto dell'opera da costruzione;</li> <li>• adibite ad attività afferenti ad un solo <i>responsabile dell'attività</i> e con i seguenti profili di rischio: <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ <math>R_{vita}</math> compresi in A1, A2, A3, A4;</li> <li>◦ <math>R_{beni}</math> pari a 1;</li> <li>◦ <math>R_{ambiente}</math> non significativo;</li> </ul> </li> <li>• densità di affollamento non superiore a 0,2 persone/m<sup>2</sup>;</li> <li>• non prevalentemente destinate ad occupanti con disabilità;</li> <li>• aventi piani situati a quota compresa tra -5 m e 12 m.</li> </ul>
III	Opere da costruzione non ricomprese negli altri criteri di attribuzione.
IV, V	Su specifica richiesta del committente, previsti da capitolati tecnici di progetto, richiesti dalla autorità competente per costruzioni destinate ad attività di particolare importanza.

Figura 6-20- Criteri di attribuzione dei livelli di prestazione Tabella S.2.2 del DM 03/08/2015 (2)

		Opera da costruzione vincolata	
		No	Sì
Opera da costruzione strategica	No	$R_{beni} = 1$	$R_{beni} = 2$
	Sì	$R_{beni} = 3$	$R_{beni} = 4$

Figura 6-21 – Profili di rischio dei beni (Tabella G.3-6 del D.M. Int. 03/08/2015)

I profili di rischio sono i seguenti:

- $R_{vita}$  pari ad A4 (tabella G 3-5 del DM03/08/2015);
- $R_{beni}$  pari a 3, sia per il tipo di costruzione sia per l'alto valore degli aeromobili all'interno dell'hangar.

Alla luce di quanto esposto, a meno di ulteriori indicazioni da parte della committenza, il livello minimo di prestazione richiesto è il livello III, che corrisponde a verificare l'assenza di collasso strutturale per la durata significativa dell'incendio. Tuttavia, l'alto valore del bene all'interno dell'infrastruttura e l'importanza strategica dell'infrastruttura potrebbe indurre la committenza ad assegnare un livello di prestazione che richiede un limitato danneggiamento, ovvero un limite agli spostamenti massimi sotto incendio, al fine di garantire il funzionamento dell'infrastruttura anche a seguito dei danni dovuti all'incendio.



Queste valutazioni sono inserite all'interno di un più ampio approccio alla sicurezza antincendio dell'hangar, il quale non può prescindere dalla valutazione e dalle procedure di sicurezza adottate dal personale operante (attività di prevenzione) e da misure integrate di protezione attiva e passiva (protezione dall'incendio).

Carico di incendio specifico di progetto	Classe minima di resistenza al fuoco
$q_{f,d} \leq 200 \text{ MJ/m}^2$	Nessun requisito
$q_{f,d} \leq 300 \text{ MJ/m}^2$	15
$q_{f,d} \leq 450 \text{ MJ/m}^2$	30
$q_{f,d} \leq 600 \text{ MJ/m}^2$	45
$q_{f,d} \leq 900 \text{ MJ/m}^2$	60
$q_{f,d} \leq 1200 \text{ MJ/m}^2$	90
$q_{f,d} \leq 1800 \text{ MJ/m}^2$	120
$q_{f,d} \leq 2400 \text{ MJ/m}^2$	180
$q_{f,d} > 2400 \text{ MJ/m}^2$	240

*Figura 6-22- Classe minima di resistenza al fuoco - Tabella S.2.3 del DM 03/08/2015 (2)*

Il carico di incendio considerato è quello derivante dal carburante, considerato nella quantità corrispondente alla capacità totale del velivolo in rimessaggio (ATR72-MP), ovvero 5.000 kg.

Il carico massimo di incendio è pari a 217.500 MJ. Il carico di incendio specifico, con riferimento alla superficie in pianta dell'intero compartimento è circa 30 MJ/mq. Se si considera l'incendio localizzato all'area coperta dal carburante sversato, il valore del carico specifico di incendio è molto più alto, pari a 986 MJ/mq ( $=217.500 \text{ MJ} / 220 \text{ m}^2$ ).

Le altezze e la geometria dell'hangar portano a concludere che l'area interessata all'incendio sia più vasta di quella derivante dal valore dell'area di impronta del carburante. La tabella S.2.3 del DM 03/08/2015 (Figura 6-22) ad un valore massimo di 900 MJ/m<sup>2</sup>, associa un requisito minimo di resistenza all'incendio nominale standard di 60 minuti.

## 6.4.2 Analisi termo-meccaniche

Sono stati implementati modelli strutturali avanzati per comprendere meglio il comportamento delle singole membrature ed il tipo di crisi sotto incendio, con il software SAFIR2016 (14), di cui si sono approfondite le ipotesi ed i metodi di calcolo nel par. 0.

E' stata modellata una delle sottostrutture principali di cui si compone l'hangar: una capriata secondaria, gravante su capriate principali che poggiano sui pilastri. La scelta di tale sottostruttura è motivata dai seguenti aspetti:

- la capriata porta i carichi verticali della copertura, che nella condizione di incendio sono rappresentati solo dai pesi propri (azione eccezionale NTC2008 (5));
- la sottostruttura è formata dai profili metallici con i più alti fattori di sezione, e quindi è l'elemento più vulnerabile della struttura.

Come risulta da elaborati progettuali l'acciaio utilizzato per gli elementi metallici è del tipo Fe510, equivalente, in termini di resistenza, ad un acciaio classificato S355 con le NTC 2008 (5).

La modellazione è stata fatta simulando numericamente l'interazione con il resto della struttura, ponendo dei carrelli in corrispondenza dell'appoggio, con una molla traslazionale di rigidezza assegnata dipendente dalla temperatura ' $k(\theta)$ ', il cui valore iniziale è quello della struttura 'a freddo'.

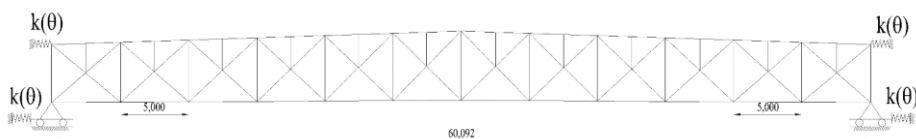


Figura 6-23 – Hangar aviorimessa, condizioni di vincolo della capriata

In Figura 6-24 sono riportate le sezioni della capriata, i loro fattori di utilizzo ed i fattori di sezione.

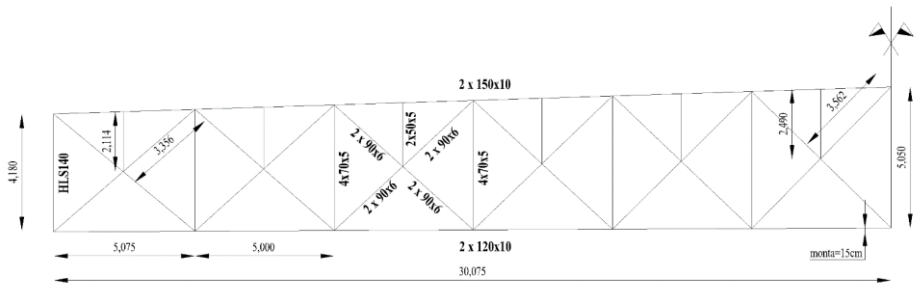


Figura 6-24 – Hangar aviorimessa, capriata secondaria

Tabella 6-2 – Fattori si sezione e di utilizzo delle sezioni più sollecitate

sezione	tipo	A [cm <sup>2</sup> ]	A <sub>p</sub> /V [m <sup>-1</sup> ]	μ <sub>0</sub>
150x10	corrente superiore	58.00	64	0.182
120x10	corrente inferiore	46.00	64	0.126
90x6	diagonale	20.40	38	0.084
4x75x5	montante principale	52.00	93	0.089
2x50x5	montante secondario	18.00	60	0.002
HLS140	montante in appoggio	21.90	55	0.365

Attraverso una verifica effettuata con il nomogramma, la sezione più vulnerabile all’incendio è il corrente superiore, il quale risulta avere una resistenza pari a R30 (35 min).

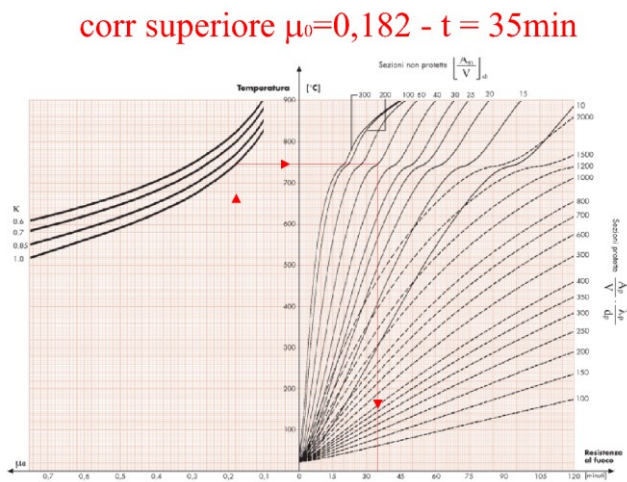


Figura 6-25 – Hangar aviorimessa- Verifica semplificata del corrente superiore con il nomogramma

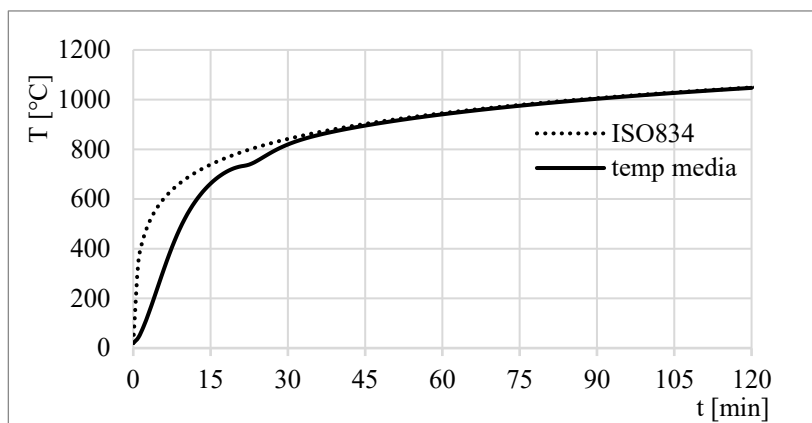


Figura 6-26 – Hangar aviorimessa – Temperatura media del corrente superiore con curva ISO834

La temperatura che si registra a 30 min con un'analisi termica avanzata della sezione è di circa 800 °C. Utilizzando le temperature medie della sezione è stata calcolata la resistenza nel dominio del tempo (44), con il campo di temperatura media illustrato in Figura 6-26. A 30 minuti si ottengono valori della resistenza molto ridotti su entrambi gli assi, come si legge in Figura 6-27.

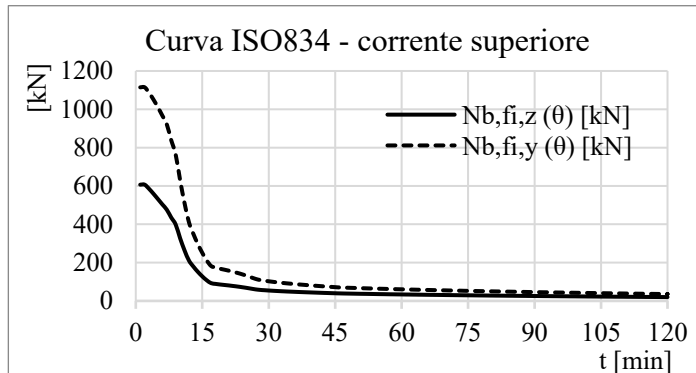


Figura 6-27 – Resistenza dello sforzo assiale di compressione nel domino del tempo, assi principali y-z del corrente superiore

## 2. Struttura non protetta e curva standard ISO834

La modellazione avanzata della struttura con curva ISO834 è utile per confrontare i risultati con quanto emerge dal nomogramma. Infatti con una modellazione strutturale avanzata si tiene in conto l'effetto delle dilatazioni termiche e delle conseguenti variazioni delle sollecitazioni iperstatiche nel

tempo. In Figura 6-28 è riportata un'analisi termica effettuata sulla sezione HLS140 del montante in corrispondenza dell'appoggio.

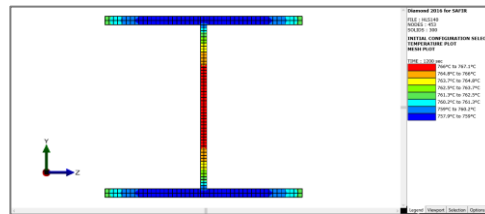


Figura 6-28 – Hangar aviorimessa – Analisi termica della sezione HLS140 –  $t=1200s / 20min$ , (Diamond)

Nel modello strutturale, implementato con SAFIR2016 dopo circa 600 s (10 minuti) la struttura diventa labile.

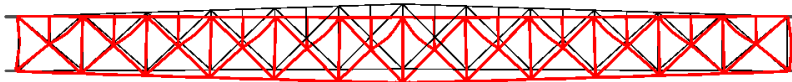


Figura 6-29 – Hangar aviorimessa – Collasso strutturale a  $t=600s$  (10min) con curva di incendio ISO834 (spostamenti x 1)

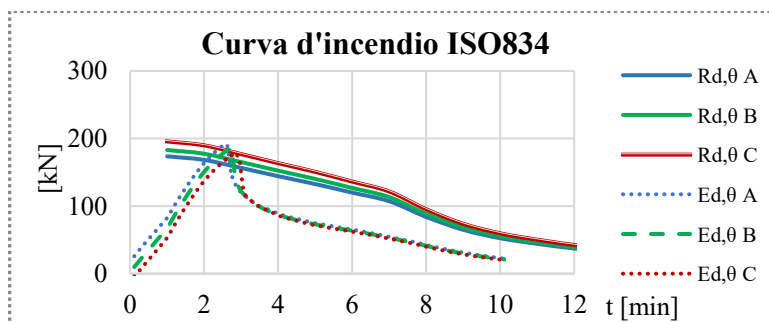
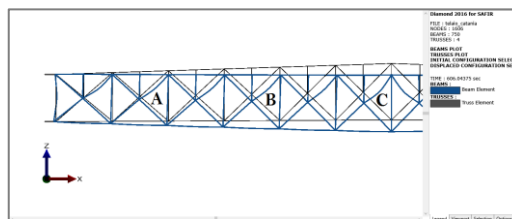


Figura 6-30 – Hangar aviorimessa – Diagonali 2x90x6,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$  (+ compr, - tens)

I diagonali raggiungono condizioni limite per compressione già prima dei 10 minuti, causando una redistribuzione delle sollecitazioni (Figura 6-30).

La struttura crolla per 2 principali aspetti:

- dopo circa 2 minuti i diagonali che trasmettono le sollecitazioni dal corrente superiore al corrente inferiore (dim 2x90x6), si instabilizzano per effetti termici;
- le sollecitazioni gravanti sul corrente superiore dopo 600s (10 min) raggiungono i valori limite di resistenza, creando una labilità strutturale.

In Figura 6-31 sono illustrate le sollecitazioni e le resistenze nel dominio del tempo, è possibile cogliere la ripartizione delle sollecitazioni dovuta ai diagonali attorno al 2° minuto, quando il valore di  $E_d$  sale repentinamente.

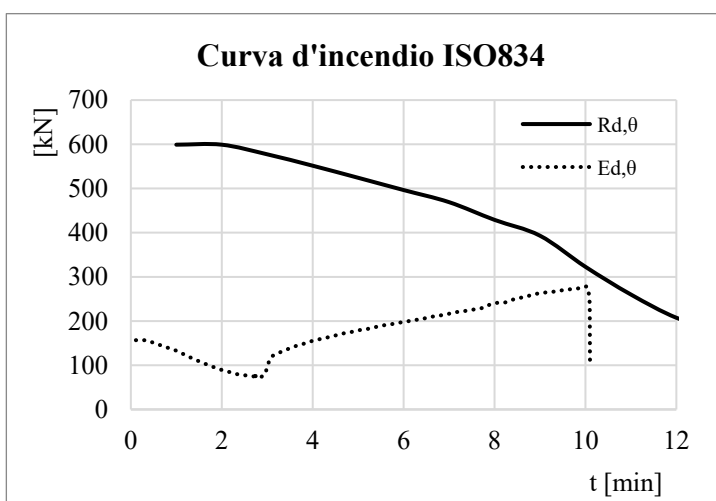


Figura 6-31 – Hangar aviorimessa – Corrente superiore 2 x 150 x 10,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$  (+ compr, - tens)

La differenza di prestazione misurata con il nomogramma rispetto ad un'analisi avanzata con curva di incendio ISO834 (35 min vs 10 min), è dovuta agli effetti iperstatici associati alle distorsioni termiche. Questo aspetto è coerente con i risultati di un lavoro nato dalla collaborazione tra Università Federico II e il Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco (43). In questo lavoro sono presenti analisi di un crollo reale dovuto ad incendio di un edificio industriale in acciaio, con analisi strutturali avanzate di resistenza all'incendio.

### 3. Struttura non protetta e curva naturale di incendio

I campi di temperatura dei modelli termo-fluidodinamici restituiscono campi di temperatura tipici di un incendio localizzato.

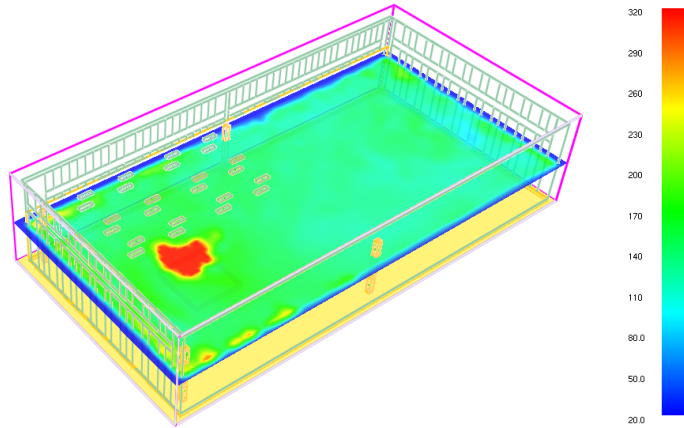


Figura 6-32 – Hangar aviorimessa – Temperatura media ambiente a quota  $z=12m$  (smoleview)

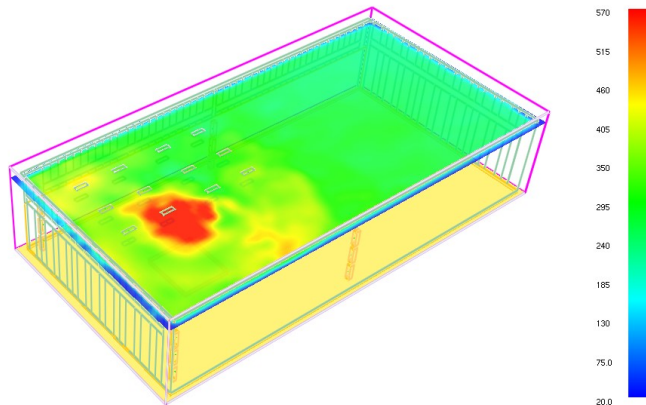


Figura 6-33 – Hangar aviorimessa – Temperatura media ambiente a quota  $z=24m$  (smoleview)

Si è scelto di applicare alle sezioni le temperature AST (Adiabatic Surface Temperature) più gravose su tutti gli elementi, perché l'esatta posizione dell'incendio non è valutabile *a priori*. Peraltro, come mostrato nel 6.3.1, le differenze di temperatura in asse trave sono generate da fenomeni termo-fluidodinamici complessi. I dati grezzi disponibili dunque sono stati analizzati criticamente, con l'obiettivo di *massimizzare* gli effetti della temperatura sulla

struttura, ovvero al fine di quantificare una prestazione di resistenza strutturale in condizioni di incendio.

Nel par. 6.3.1 è presente un approfondimento sulle analisi termo-fluidodinamiche avanzate, con particolare riguardo ai gradienti della temperatura misurata sulle strutture (Adiabatic Surface Temperature (12)).

Nonostante le alte temperature raggiunte in poco tempo (600 °C all'interno sezione dopo 2 minuti), l'analisi termo-meccanica non rileva collassi strutturali. Le notevoli potenze rilasciate nell'ambiente fanno raggiungere alle sezioni una temperatura media maggiore, seppure poi segue una fase di raffreddamento. L'incendio, come già illustrato, ha una durata di circa 7 minuti, in Figura 6-34 sono riportate le differenze di temperatura in una sezione componente la capriata.

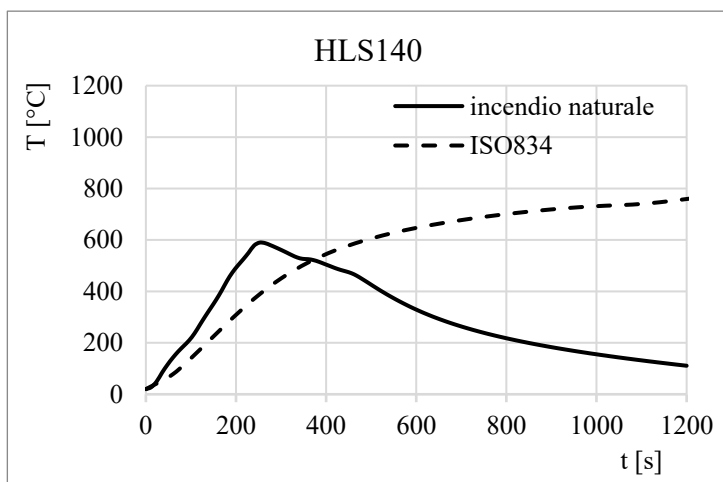


Figura 6-34 – Temperature medie all'interno della sezione con curve di incendio convenzionali e naturali

Pur non raggiungendo il collasso la struttura presenta un danneggiamento dovuto all'instabilizzazione dei diagonali (Figura 6-35).



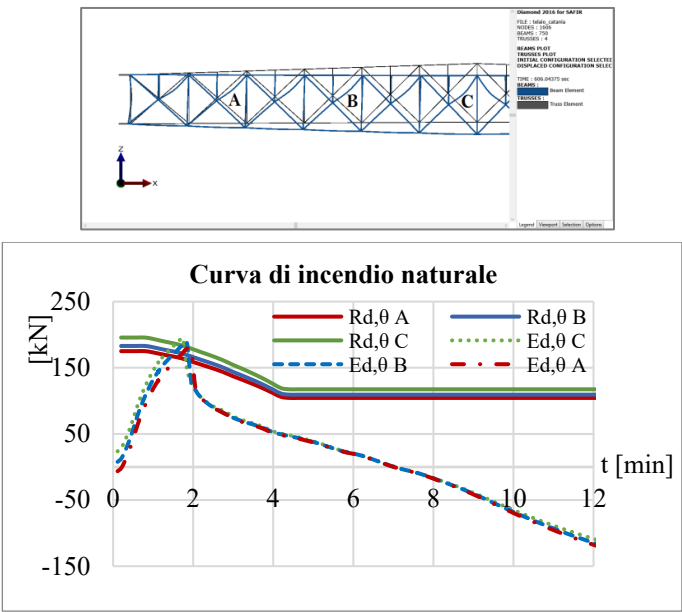


Figura 6-35 – Hangar aviorimessa – Diagonali 2x90x6,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$  (+ compr, - tens)

Le verifiche sulle sollecitazioni e sulle resistenze nel dominio del tempo del corrente superiore e di quello inferiore, risultano soddisfatte per l'intera durata dell'incendio (Figura 6-36 e Figura 6-37).

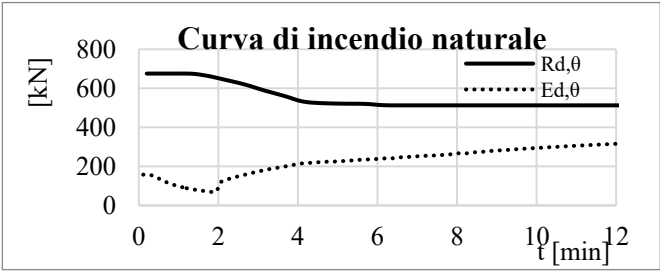


Figura 6-36 – Hangar aviorimessa – Corrente superiore 2x150x10,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$

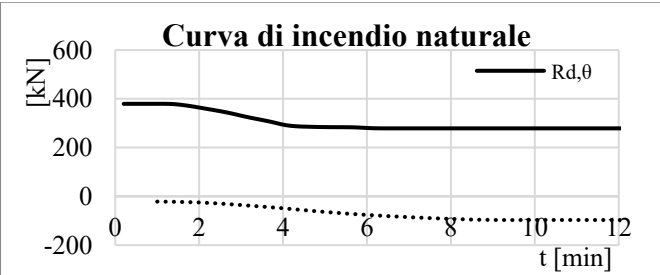


Figura 6-37 – Hangar aviorimessa – Corrente inferiore 2x120x10,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$

#### 4. Struttura protetta e curva standard ISO834

Sono state compiute analisi termo-meccaniche con curva di incendio ISO834. La struttura protetta con questa curva di incendio crolla dopo circa 63 minuti.

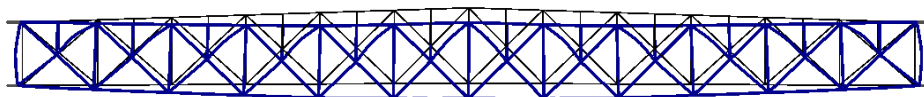


Figura 6-38 – Hangar aviorimessa – Collasso strutturale a  $t=3785s$  (63min) con struttura protetta e curva di incendio ISO834 (spostamenti  $\times 1$ )

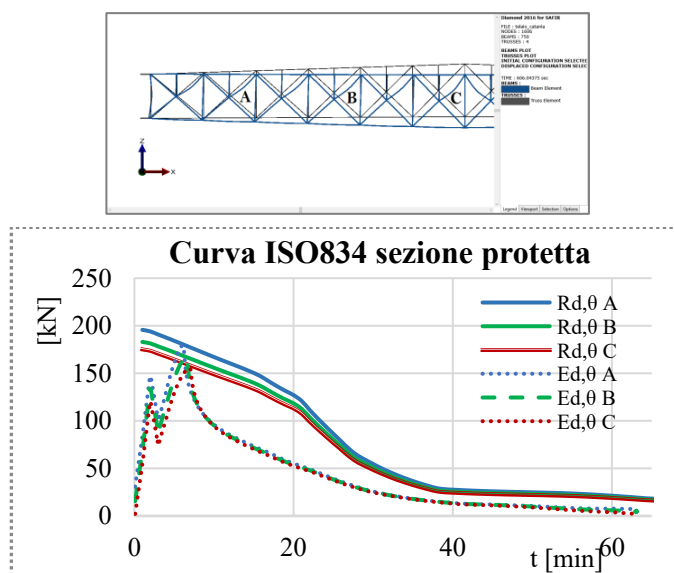


Figura 6-39 – Hangar aviorimessa – Diagonali  $2 \times 90 \times 6$ ,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$  (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di  $1200 \mu m$ .

Il meccanismo di collasso è il medesimo della struttura sottoposta a curva ISO834 (Figura 6-38), ovvero avviene un primo rilassamento della struttura dovuto alla crisi dei diagonali (Figura 6-39).

Il collasso è raggiunto a causa del corrente inferiore, nel quale le sollecitazioni per effetti termici non si incrementano con una velocità eccessiva, sono piuttosto le resistenze a degradare a causa delle temperature nella sezione (Figura 6-40).

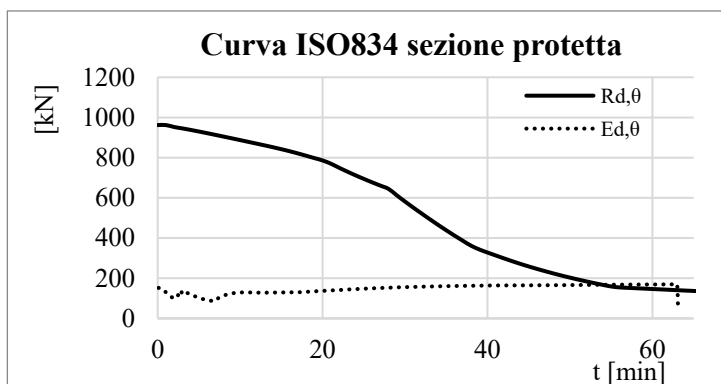


Figura 6-40 – Hangar aviorimessa – Corrente superiore 2x150x10,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$  (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200  $\mu\text{m}$ .

Nel corrente inferiore le verifiche al tempo del collasso risultano soddisfatte, anche se i valori di sollecitazione sono di poco inferiori a quelli di resistenza (Figura 6-41).

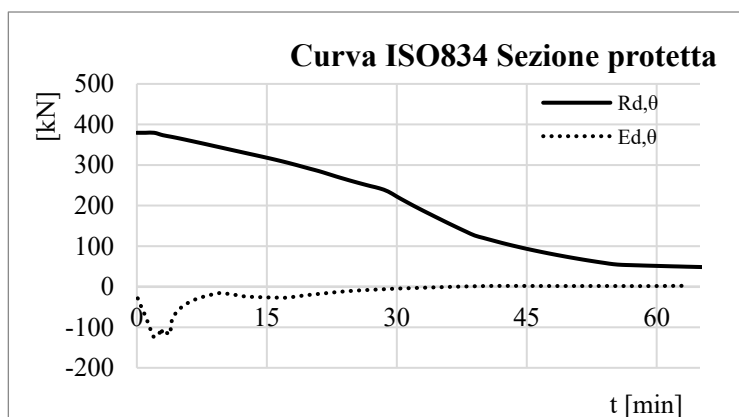


Figura 6-41 – Hangar aviorimessa – Corrente inferiore 2x120x10,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$  (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200  $\mu\text{m}$ .

## 5. Struttura protetta e curva naturale di incendio

Il comportamento della struttura non protetta sottoposta a curve di incendio naturali indica che:

- il livello di prestazione di resistenza al fuoco è soddisfatto in quanto per tutta la durata dell'incendio la struttura non crolla;
- la struttura ha un grado di danneggiamento a seguito dell'instabilità dei diagonali 2x90x6, inoltre in molte sezioni vengono raggiunti i 600 °C.

Al fine di valutare altre soluzioni che siano in grado di fornire alla struttura la capacità di resistenza in condizioni di incendio, o di limitare nel contempo il danneggiamento, ne è stato studiato il comportamento proteggendo tutte le sezioni e verificando le resistenze e le sollecitazioni degli elementi per l'intera durata dell'incendio.

Le analisi termiche di sezioni protette sottoposte a curve di incendio naturali mostrano l'efficacia delle protezioni, soprattutto perché è presente la fase di raffreddamento.

Il flusso termico sulle sezioni, calcolato con i modelli CFD, ha un andamento impulsivo, in quanto vengono raggiunte temperature molto alte in poco tempo, ma le stesse vengono mantenute per un tempo breve. La sezione comincia a raffreddarsi, nel caso specifico, già dopo i primi minuti. Esiste un forte transitorio termico, l'azione protettiva delle vernici limita gli effetti di aumenti repentini di temperatura. In Figura 6-42 è mostrato il confronto tra i due casi descritti di una sezione della struttura: i diagonali 2 x 90 x 6. Le temperature massime sono sempre comprese tra i 200 ed i 300 °C. A queste temperature l'acciaio conserva ancora tutta la sua resistenza.

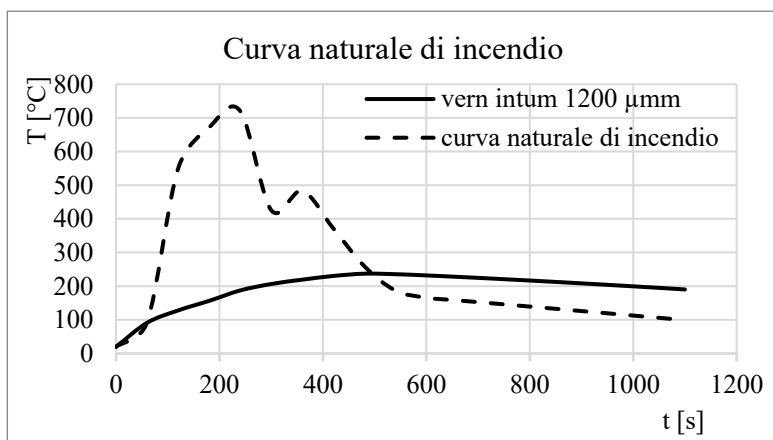


Figura 6-42 – Temperature medie all'interno dei diagonali 2x90x6 con curve di incendio e struttura protetta e non protetta

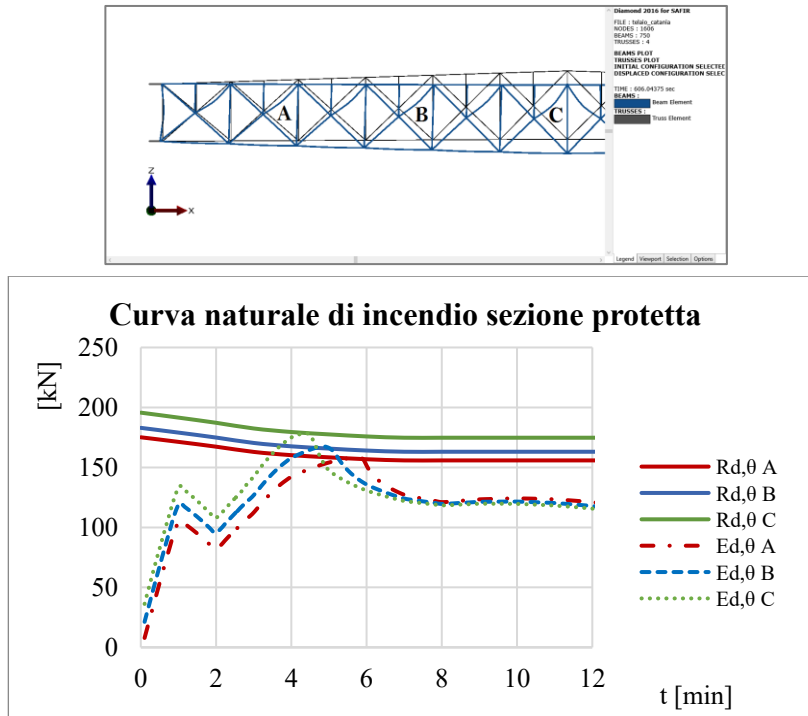


Figura 6-43 – Hangar aviorimessa – Diagonali 2x90x6,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$  (+ compr, - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200  $\mu\text{m}$ .

Le verifiche nel dominio del tempo delle sezioni diagonali (Figura 6-43) mostrano un aumento della sollecitazione attorno ai 4 minuti di incendio, fino quasi a raggiungere il valore limite di resistenza di sforzo normale in compressione semplice. Tale valore non viene sicuramente superato; infatti il punto di massimo del diagramma di sollecitazione è attinto alla fine della durata dell'incendio, e le sezioni, nella fase di raffreddamento presentano valori sollecitazioni di sforzo normale in compressione elevati.

Nel corrente superiore i valori di sollecitazione sono molto minori di quelli di resistenza.

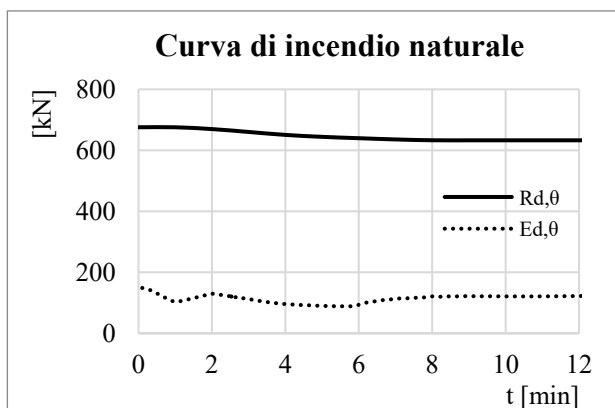


Figura 6-44 – Hangar aviorimessa – Corrente superiore 2x150x10,  $R_{d,\theta}$ - $S_{d,\theta}$  (+ compr. - tens), protezione di strato di vernice intumescente di 1200  $\mu\text{m}$ .

## 6.5 Commenti ai risultati ottenuti

Le attività di aviorimessa, quali quelle tipiche dell'Aeronautica Militare, configurano una categoria di edifici industriali sottoposta a controllo di prevenzione incendi, pur non possedendo una regola tecnica verticale. Esistono, tuttavia, normative in altri paesi industrializzati, tra cui la norma NFPA409, normativa statunitense prescrittiva specifica per aviorimesse (di cui si è parlato nel par.2.3).

Utilizzare l'approccio ingegneristico per questo tipo di attività può costituire un vantaggio. Con tale approccio i livelli richiesti di prestazione di resistenza al fuoco tengono conto del valore del bene e del rischio associato ad esso.

Il valore del bene, nel caso esaminato, è il velivolo all'interno, più che l'edificio in sé. Inoltre, i velivoli militari, rispetto a quelli civili, sono generalmente dotati di apparecchiature di valore.

Nelle analisi svolte nell'ambito del presente lavoro, si è analizzato il velivolo all'interno dell'hangar, la sua posizione, e le procedure con le quali il personale operativo, svolge le operazioni di 'hangaraggio' dell'aeromobile.

A meno di ulteriori requisiti da parte della committenza, il livello di prestazione di resistenza al fuoco richiesto è il livello III.

Il carico di incendio considerato è quello derivante dal carburante, considerato nella quantità corrispondente alla capacità totale del velivolo in rimessaggio (ATR72-MP), ovvero 5.000 kg.

La richiesta associata al livello di prestazione III, quando si applica l'approccio prescrittivo, è di assicurare la resistenza della struttura per 60 minuti (R60) di esposizione all'incendio nominale standard. Nel caso di approccio ingegneristico, invece, occorre verificare l'assenza di collasso per la durata significativa dell'incendio.

La verifica applicando l'approccio prescrittivo è stata condotta sia effettuando analisi strutturali semplificate "per singoli elementi", che analisi strutturali avanzate.

Le sezioni con un fattore di utilizzazione maggiore sono risultate il corrente inferiore ed il corrente superiore. Il corrente superiore della capriata è una sezione angolare doppia 2L150x10, con luce di 5,00 m. Il suo fattore di sezione è di  $64 \text{ m}^{-1}$ . Essendo sottoposto a sforzi di compressione già nella configurazione 'a freddo', risulta un elemento critico. La verifica di resistenza con l'approccio prescrittivo basato sull'analisi per singoli elementi ed applicando il nomogramma ha restituito una classe di resistenza R30 ( $t_R=35 \text{ min}$ ). Tale valore è inferiore al requisito richiesto R60 con riferimento alla curva di incendio nominale standard ISO834.

L'analisi termo-strutturale applicando il modello agli elementi finiti e con riferimento sempre alla curva nominale standard ISO834, che tiene conto della variazione delle sollecitazioni prodotte dalle distorsioni termiche, ha evidenziato un tempo di incendio massimo pari a 10 minuti. Il corrente superiore ha ceduto a causa dell'aumento delle sollecitazioni di compressione prodotte dagli effetti termici e della contemporanea riduzione della resistenza meccanica prodotta dall'aumento della temperatura.

Pertanto sono state valutate le prestazioni strutturali con sezioni interamente protette da vernice intumescente di spessore  $1200 \text{ }\mu\text{m}$ , i cui parametri sono stati presi da una serie di test effettuati in forno su alcuni specifici prodotti (45).

L'analisi con curva standard ISO834 e struttura protetta da vernici intumescenti dello spessore di 1200  $\mu\text{m}$  fornisce un tempo di resistenza all'incendio pari a 63 min. In questo caso il requisito di R60 è quindi soddisfatto.

Relativamente all'approccio ingegneristico, sono state condotte analisi termofluidodinamiche avanzate su un modello agli elementi finiti dell'hangar. Il fine di tali analisi è stato di riuscire a cogliere il gradiente di temperatura tra le varie zone della struttura metallica di copertura.

Le condizioni del problema, caratterizzato da una distribuzione non uniforme del carico di incendio, non permettono di operare nelle ipotesi di modelli di incendio semplificati, infatti:

- l'elevato gradiente di temperatura tra le diverse parti del compartimento non è apprezzabile con i comuni modelli a zona (9);
- l'estensione in pianta del compartimento non permette l'uso delle curve parametriche, basate sui rapporti di area tra le superfici chiuse e quelle aperte ( (9));
- le notevoli potenze termiche sono superiori a quelle massime consentite dall'applicazione del metodo di Hasemi per gli incendi localizzati ( (9)).

Le curve di incendio utilizzate nelle analisi sono state la curva ISO834 per l'applicazione dell'approccio prescrittivo e le curve naturali derivanti dal modello termofluidodinamico implementato mediante il software FDS, nel caso dell'approccio ingegneristico. La struttura metallica è stata considerata nelle due configurazioni di assenza e presenza di protezione antincendio (struttura non protetta e protetta).

I metodi di verifica delle strutture adottati hanno riguardato metodi semplificati e metodi avanzati.

Le temperature massime calcolate nell'hangar nel caso di approccio ingegneristico sono state di più di 900 °C, in corrispondenza del corrente superiore della capriata. Le temperature nella parte più alta della capriata ( $z=24,0\text{m}$ ) hanno un valore medio di 50 °C circa più elevato di quelle in corrispondenza dei correnti inferiori ( $z=20,4\text{m}$ ). Le aperture finestrate dell'hangar raggiungono la quota di 19m.



Le temperature più alte sono in asse al centro dell'area di incendio, spostate leggermente verso le aperture.

La configurazione con portali di ingresso chiusi è la configurazione con temperature maggiori.

Ad eccezione dei picchi di temperatura in corrispondenza dell'incendio (Figura 6-45), il gradiente di temperatura è basso lungo l'asse della capriata (Adiabatic Surface Temperature) (Figura 6-46).

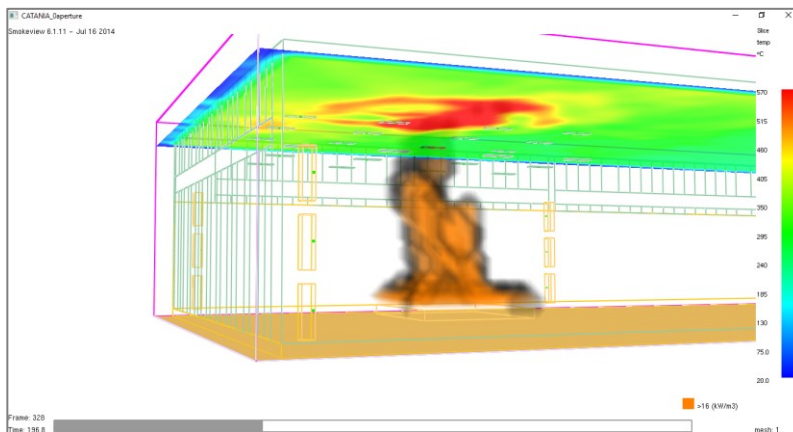


Figura 6-45 – Hangar aviorimessa: gradiente delle temperature medie in corrispondenza del corrente superiore –  $z=24m$  (smokeview)

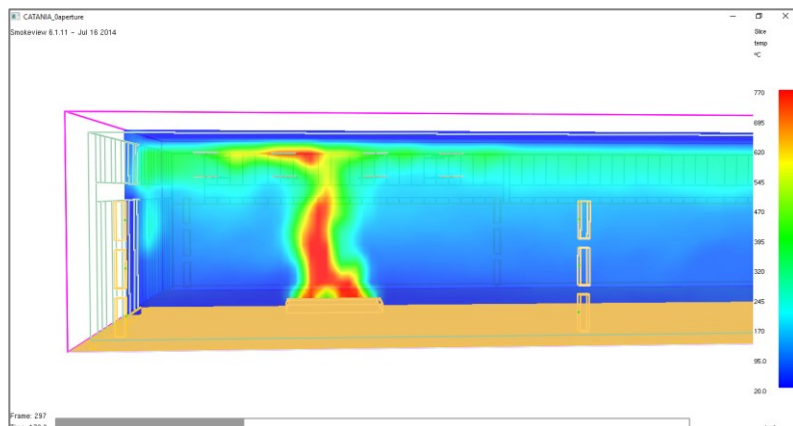


Figura 6-46 – Hangar aviorimessa: gradiente delle temperature medie lungo l'asse della capriata centrale (smokeview)

Nell'applicazione dell'approccio ingegneristico, l'analisi della struttura, inoltre, è stata svolta con riferimento alle curve naturali di incendio. Il modello CFD

implementato restituisce campi di temperatura con picchi in corrispondenza dell'asse dell'incendio.

L'obiettivo di tali modellazioni è finalizzato anzitutto alla misurazione della capacità di resistenza al fuoco dell'hangar metallico. La posizione del carico d'incendio (velivolo) è stata ipotizzata centrale. La distribuzione delle temperature alla quota della capriata dipende da molteplici fattori, quali ad esempio la velocità esterna del vento, le condizioni di pressione e umidità dell'aria, ed altri. Tali fattori non sono stati specificamente valutati in questo lavoro, ipotizzando condizioni standard (temperatura iniziale di 20 °C, pressione standard etc). Questi aspetti hanno portato a trascurare le differenze di temperatura seppure registrate in asse della capriata, ma a considerare il campo di temperatura più gravoso sull'intero asse, seppure gli altri valori non fossero tanto lontani da esso.

Con le curve naturali di incendio così ottenute si è effettuata un'analisi avanzata della struttura non protetta: la struttura non è collassata per l'intera durata dell'incendio. In questa configurazione, tuttavia, si è riscontrato il danneggiamento degli elementi diagonali compressi (angolari doppi 2L90x6), i quali mostrano fenomeni di instabilità dopo 2 minuti. Il modello termofluidodinamico fornisce informazioni a riguardo: dopo 2 minuti le temperature sugli elementi strutturali sono già superiori al valore di 800 °C, seppure restano tali solo per alcune decine di secondi.

Il danneggiamento della struttura potrebbe non fare parte del requisito strutturale richiesto dalla committenza, cosa coerente con il livello di prestazione III.

A tal fine sono state misurate le prestazioni strutturali con curva di incendio naturale e sezioni protette da uno strato di 1200 µm di vernice intumescente.

Le prestazioni strutturali in queste condizioni sono caratterizzate da un limitato stato di danneggiamento, come confermato dalle seguenti valutazioni:

- le verifiche strutturali effettuate con il software per la costruzione dei domini di resistenza implementato in questo lavoro di dottorato non fanno registrare alcun superamento delle resistenze delle sezioni metalliche;

- il campo di spostamenti registrato con l'analisi avanzata conferma che nessuna sezione si è instabilizzata, compresi i diagonal;
- le analisi termiche delle sezioni restituiscono temperature massime comprese tra 200 e 300 °C.

Il riepilogo delle prestazioni di resistenza al fuoco della struttura non protetta e protetta, con riferimento ai due approcci utilizzati ed alle rispettive curve di incendio, è riportato in tabella 6-3.

*tabella 6-3 – Riepilogo dei valori di resistenza al fuoco dell'aviorimessa in caso di elementi protetti e non protetti con vernici intumescenti di spessore di 1200  $\mu\text{mm}$*

<div> <div>ESPOSIZIONE</div> <div>CURVA INCENDIO</div> </div>	STRUTTURA NON PROTETTA	STRUTTURA PROTETTA
ISO834	$t = 10 \text{ min}$	$t = 63 \text{ min}$
CURVA NATURALE	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio e struttura con limitato danneggiamento

Il raggiungimento dei requisiti di prestazione, come indicato dalla norma (DM 03/08/2015 – Norme tecniche di prevenzione incendi (2)), dipende dal tipo di soluzioni adottate.

Le soluzioni conformi devono raggiungere il requisito con curve di incendio convenzionali (curva nominale standard). Qualora si adottino 'soluzioni alternative' o 'in deroga' si possono utilizzare le curve di incendio naturali, ed il requisito riguardante il mantenimento della capacità portante è espresso nell'allegato M.2 "Scenari di incendio per la progettazione prestazionale" (DM 03/08/2015). Alla tabella M.2-1 sull'obiettivo del 'mantenimento della capacità portante': "Dall'evento iniziatore fino all'arresto dell'analisi strutturale, in fase di raffreddamento, al momento in cui gli effetti dell'incendio sono ritenuti non significativi in termini di variazione temporale delle caratteristiche della sollecitazione e degli spostamenti'.

tabella 6-4 – Livelli di prestazione di resistenza al fuoco dell'aviorimessa in caso di elementi protetti e non protetti con vernici intumescenti di spessore di 1200  $\mu\text{m}$

TIPOLOGIA PROTEZIONE	CURVA DI INCENDIO	REQUISITO	VERIFICA LIVELLO
NON PROTETTA	ISO834	LIV III: 60 min	NO
	curve di incendio naturali	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	SI
PROTEZIONE TOTALE	ISO834	LIV III: 60 min	SI (R60)
	curve di incendio naturali	$R_{d,0} > E_{d,0}$ per l'intera durata di incendio	SI

I risultati delle analisi avanzate sono utili per confrontare i campi di spostamento che si ottengono in caso di struttura non protetta e protetta, con riferimento a curve nominali e curve naturali.

Nel caso di soluzioni conformi, e quindi curve di incendio nominali, si fa riferimento ai valori di norma relativi al livello di prestazione IV, riportati in tabella 6-5 – Limiti di deformabilità per 'soluzioni conformi' livello di prestazione IV (DM.Int.03/08/2015).

tabella 6-5 – Limiti di deformabilità per 'soluzioni conformi' livello di prestazione IV (DM.Int.03/08/2015) (2)

tipologia strutturale	parametro di controllo	valore limite
travi e solai	$\delta_{v,max}/L$	1/100
piastre	$\delta_{v,max}/L$	1/100
el.verticali	$\delta_{h,max}/H$	1/100

Lo spostamento della struttura non protetta prodotto dalla curva ISO834 ovviamente non rispetta il limite, in quanto la struttura diventa labile dopo circa 10 minuti, come mostrato nelle analisi termo-meccaniche. Lo spostamento in

mezzeria della struttura non protetta mostra invece valori accettabili nel caso di incendio naturale (20,4 cm), che risultano inferiori al valore limite di  $L/100$  (60 cm) indicato dalla normativa per soluzioni conformi (tabella 6-5).

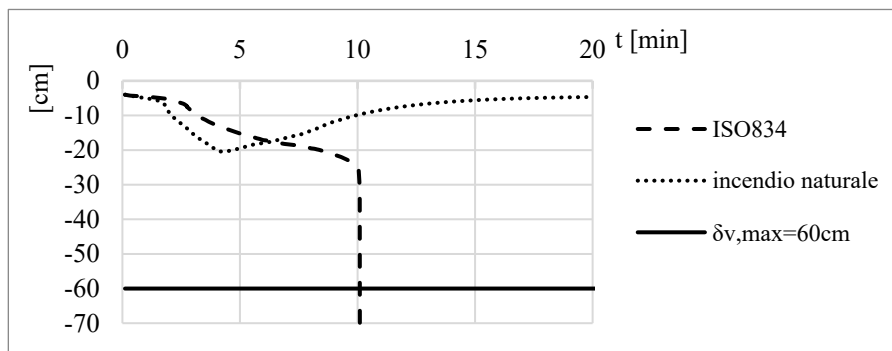


Figura 6-47 – Spostamenti in mezzeria capriata non protetta - incendio naturale vs ISO834

Infine, il valore massimo di abbassamento in mezzeria della struttura protetta, sottoposta ad incendio naturale, è di 6,07 cm. Tale valore viene raggiunto dopo circa 8 min di esposizione all'incendio. Invece, l'abbassamento massimo in mezzeria della struttura non protetta è di 20,4 cm, e viene raggiunto dopo circa 4 minuti. Lo scostamento temporale tra i valori massimi è dovuto all'azione di protezione delle vernici intumescenti, i cui ridotti valori di conducibilità rallentano l'effetto del flusso termico sull'elemento.

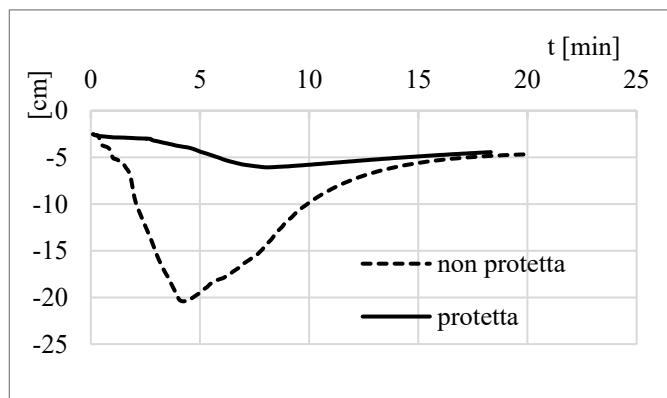


Figura 6-48 – Spostamenti in mezzeria capriata – incendio naturale

In definitiva, l'approccio ingegneristico applicato ad hangar tipici dell'aeronautica militare consente di apprezzare, mediante modelli

termofluidodinamici avanzati, la variabilità dei campi termici nelle strutture per effetto della forte concentrazione del carico d'incendio (velivolo) e di tener conto di ciò nelle analisi termo-strutturali, anch'esse effettuate con modelli avanzati. I risultati presentati mostrano anche la possibilità di valutare il soddisfacimento o meno di livelli di prestazione superiori a quello di base (Livello III), che introducono la necessità di verificare un limitato danneggiamento della struttura (Livello di prestazione IV). Tale livello dovrebbe costituire un requisito minimo per costruzioni strategiche, quali quelle dell'Aeronautica Militare.

## 7 Conclusioni

Il raggiungimento della sicurezza in condizioni di incendio richiede un approccio olistico: sono numerosi e molto differenti tra loro i settori disciplinari utili alla descrizione del fenomeno dell'incendio e soprattutto a determinarne gli effetti.

Il presente lavoro di tesi è inquadrato nello studio della sicurezza delle strutture metalliche in condizioni di incendio. La disciplina che studia tale tematica è la Structural Fire Safety Engineering (S.F.S.E.), quella parte della “Ingegneria della sicurezza antincendio” volta a studiare le capacità portanti delle strutture in condizioni di incendio.

Lo studio propone temi di interesse scientifico, in quanto sono state indagate ed approfondite le metodologie attualmente disponibili per la caratterizzazione dell'incendio in un edificio, e per la valutazione dei suoi effetti sulla struttura.

La SFSE consente di misurare la capacità portante delle strutture in condizioni di incendio. Si basa un metodo di risk analysis di quantificazione del rischio, ovvero della misurazione delle capacità reali della struttura rispetto a requisiti di prestazione assegnati. Vengono individuati gli scenari di incendio con un maggiore rischio associato. Le informazioni sulla geometria dei compartimenti, dei materiali e delle sostanze combustibili e del tipo di attività consentono di modellare l'incendio con modelli CFD. Le informazioni sulla struttura e sul degrado meccanico con la temperatura dei materiali costruttivi permettono l'implementazione di modelli termo-meccanici avanzati. I risultati hanno il vantaggio di descrivere le reali prestazioni della struttura, e di misurare la

differenza tra capacità e domanda. Con l'approccio ingegneristico, la progettazione degli interventi può essere mirata alle misure atte ad incrementare la capacità fino al requisito richiesto. Rispetto ad approcci semplificati, quindi si misura la reale efficacia degli interventi, che risultano anche essere più efficienti. Questo procedimento è valido sia per edifici esistenti sia per edifici di nuova progettazione.

Il metodo per gli edifici esistenti, ad esempio nel cambio di destinazione d'uso o dell'obbligo normativo di messa in sicurezza in condizioni di incendio, ha i suoi punti di forza nell'efficienza: progettando le misure con l'approccio ingegneristico c'è la reale possibilità di ridurre i costi. Nella progettazione di edifici ex-novo un punto a favore è rappresentato dall'efficacia della progettazione, poichè è possibile studiare misure *ad hoc* per raggiungere bassi campi di spostamenti e di danneggiamento, tali da garantire livelli di prestazione IV o V, richiesti per gli edifici strategici.

Sono stati studiati due casi reali di hangar metallici tipici in dotazione all'Aeronautica Militare Italiana, caratterizzati da due distinte destinazioni d'uso:

- hangar ad uso magazzino per carico e scarico di materiali a supporto di voli di operazioni internazionali, con struttura metallica risalente ai primi anni '60;
- hangar adibito ad aviorimessa contenente un velivolo militare di medie dimensioni, di recente costruzione.

Partendo dalla conoscenza del quadro normativo storico, si è fatto riferimento al recente Decreto del Ministero dell'Interno 3 agosto 2015 (*Norme Tecniche di Prevenzione Incendi*), grazie al quale l'approccio ingegneristico alla sicurezza antincendio è stato considerato come paritetico al tradizionale approccio prescrittivo. Nel medio termine saranno emanate una serie di regole tecniche verticali che consentiranno l'uso dell'approccio ingegneristico in luogo delle vigenti norme prescrittive (ad esempio in contemporanea con la stesura finale di questo lavoro è stata emanata la norma verticale per le autorimesse, che fornisce indicazioni sull'applicazione dell'approccio ingegneristico a questo tipo di costruzioni - D.M.Int. 21/02/2017).



Nei due hangar oggetto di studio si è operato un confronto in termini di efficacia tra approcci semplificati ed approccio ingegneristico, attraverso la valutazione, misurando i livelli di resistenza al fuoco, di soluzioni progettuali di protezione delle strutture metalliche con vernici intumescenti.

Il primo hangar analizzato è un hangar magazzino, utilizzato per il carico e lo scarico dei materiali, quindi caratterizzato da presenza di personale qualificato e pienamente consapevole dell'ambiente in cui opera, talchè i tempi di occupazione del compartimento da parte di persone sono ridotti. Il requisito per questa tipologia di attività, in coerenza con le NTC 2008 ed il DM 03/08/2015, è il livello II.

La geometria della struttura è stata rilevata in situ e attraverso ricerca documentale, il legame costitutivo dell'acciaio utilizzato è stato ricavato da test su provini prelevati in loco. Relativamente alla definizione del carico di incendio, dipendente dai materiali combustibili presenti nel compartimento, si è osservato come l'uso magazzino di stoccaggio sia caratterizzato da una notevole variabilità nella distribuzione dei materiali nel compartimento, e, quindi, della quantità totale del carico di incendio.

Sono stati analizzati i registri di carico e scarico dei materiali per un periodo di dieci anni ed individuati due scenari di incendio rappresentativi delle condizioni più sfavorevoli per la struttura:

- uno scenario con alto carico di incendio totale e materiali stoccati in superfici ridotte (alto carico di incendio specifico);
- uno scenario con alto carico di incendio totale e materiali distribuiti più uniformemente sulla superficie del compartimento (basso carico di incendio specifico).

La caratterizzazione dell'incendio si è avvalsa di test ed esperimenti fatti sui numerosi materiali all'interno dell'hangar. I risultati sono utili per caratterizzare la potenza massima dell'incendio; sono state anche effettuate opportune valutazioni numeriche basate su metodi proposti in letteratura.

Il carico massimo di incendio rilevato è di 355.000 MJ, sull'area del compartimento di circa 1200 m<sup>2</sup>.

La caratterizzazione delle curve di rilascio termico è stata fatta per entrambi gli scenari descritti. Le potenze massime per i due scenari sono state di 200 MW per lo Scenario 1 (localizzato) e 75 MW per lo Scenario 2 (distribuito).

Le potenze massime calcolate con i dati sperimentali, nel caso di scenario con incendi localizzati sono molto superiori a quelle calcolate con curva di normativa (205MW vs 65MW), mentre nel caso di scenario con carichi distribuiti, la curva di normativa sovrastima l'effettiva potenza massima rilasciata (200MW vs 55MW).

Con questi scenari, ed in varie configurazioni di aperture, si sono operati dei test numerici di benchmark su software di modellazione semplificata di curve di incendio: CFAST, Ozone. I confronti restituiscono scostamenti accettabili.

Tuttavia, applicando i modelli CFD avanzati mediante il software FDS (Fire Dynamics Simulation), sviluppato dal NIST (National Institute of Standards and Technology), si è evidenziato che in questo tipo di ambienti industriali con compartimenti ampi e carichi di incendio caratterizzati da elevata potenza termica, i modelli d'incendio a zone (CFAST e Ozone) non riescono a cogliere i rilevanti gradienti termici, in pianta ed in altezza.

La verifica semplificata della resistenza strutturale sotto incendio, sviluppata mediante l'analisi per singoli elementi con il nomogramma, ha evidenziato una classe di resistenza al fuoco minore di R15, avendo una resistenza nominale di 12 minuti.

Sono stati sviluppati poi modelli strutturali avanzati utilizzando il condice di calcolo SAFIR. Esso è in grado di compiere analisi termo-meccaniche non lineari nel campo dei grandi spostamenti, nel dominio del tempo, in funzione delle curve di incendio implementate.

Le analisi hanno riguardato la struttura non protetta e quella protetta con vernici intumescenti, con curve naturali di incendio (FDS) e curve convenzionali.

Come detto, per il livello II richiesto per questa tipologia di attività, viene confrontata la domanda con la capacità solo in termini di resistenza strutturale. La domanda, per curve convenzionali, è funzione della distribuzione e quantità del carico di incendio, ed è rappresentata da tempi di resistenza (R60 nel caso

specifico). Se si utilizzano curve naturali di incendio la domanda è rappresentata dal mantenimento della capacità portante per l'intera durata dell'incendio.

Data l'alta vulnerabilità della struttura in condizioni di incendio, sono state valutate anche le prestazioni della stessa struttura protetta con vernici intumescenti, nei confronti di curve di incendio convenzionali e di curve di incendio nominali. Nel caso di curve convenzionali di incendio (curva nominale standard) e modelli strutturali avanzati, le misure di protezione passiva ipotizzate sono inefficaci in quanto non si raggiunge il requisito dei 60 minuti. Con l'approccio ingegneristico, ovvero curve naturali di incendio e modellazione strutturale avanzata, il requisito di resistenza all'incendio per l'intera durata dello stesso è soddisfatto.

Dato che la struttura è degli anni '60, con una ridotta vita utile, utilizzando i metodi della Fire Safety Engineering, si è delineata una strategia antincendio tesa ad ottenere il livello II, ma ottimizzata negli interventi di protezione degli elementi.

Questa strategia è consistita nell'operare nel seguente modo:

- minimizzare il rischio associato ad un scenario con carichi localizzati agendo sulle modalità di stoccaggio delle merci: questa misura è atta a ridurre le probabilità di accadimento e quindi il rischio correlato;
- utilizzare curve naturali di incendio (rilevando sperimentalmente i carichi e le potenze associate), in modo che la domanda di prestazione fosse riferita esclusivamente al superamento del dato scenario di incendio;
- utilizzare analisi termo-meccaniche avanzate per misurare la reale capacità della struttura in condizioni di incendio;
- selezionare gli elementi critici da proteggere misurando, con analisi avanzate, l'efficacia degli interventi progettuali di protezione.

La struttura parzialmente protetta con vernici intumescenti sottoposta a curve di incendio reali, sulla quale si è intervenuti con una strategia antincendio basata sulla misurazione del danno, e quindi del rischio, soddisfa il requisito del livello II, ed anche del livello superiore (livello III).

Lo stesso tipo di intervento progettuale, verificato con curve convenzionali di incendio possiede una capacità di R30 ( $t_R=40\text{min}$ ), inferiore alla domanda di R60. Si deduce che utilizzare l'approccio ingegneristico permette di misurare i reali incrementi di resistenza strutturale in condizioni di incendio di un dato intervento progettuale.

I valori di spostamento della struttura parzialmente protetta sono risultati accettabili, con spostamenti in mezzeria della travatura orizzontale dell'ordine di 1/100 delle luci, e spostamenti in testa agli elementi verticali del reticolato metallico dell'ordine di 1/50 dell'altezza. Il grado di danneggiamento è risultato maggiore per la struttura parzialmente protetta, che non in quella totalmente protetta, con elementi diagonali molto snelli che si sono instabilizzati per compressione.

L'altra struttura oggetto del seguente lavoro è un hangar aviorimessa con copertura metallica poggiante su pilastri in c.a.. L'altezza totale è di circa 24 m, lo sviluppo frontale di 126 m e quello laterale di 60 m circa. All'interno sono riposti due velivoli di medie dimensioni (ATR72-MP).

La tutela dei beni è uno degli aspetti da considerare nella sicurezza antincendio (insieme alla salvaguardia della vita e dell'ambiente). In questo caso il bene maggiore è il velivolo, il quale possiede molto più valore della struttura stessa.

Questa tipologia di edifici rappresenta una tipologia di strutture strategiche, e quindi il livello di prestazione strutturale richiesto è pari al livello IV o livello V. In rapporto alla distribuzione del carico (incendio localizzato con  $q_f=900\text{ MJ/m}^2$ ) la domanda di resistenza per incendi convenzionali è R60; per la verifica di limitato danneggiamento, condotta limitando gli spostamenti massimi, per il livello di prestazione IV è richiesto un valore massimo inferiore a 1/100 delle rispettive luci, ed un grado di danneggiamento non eccessivo della struttura.

In effetti, le aviorimesse con superficie maggiore di  $500\text{ m}^2$  costituiscono una delle poche eccezioni nella norma italiana, in quanto, seppure soggette a controllo di prevenzione incendi da parte dei Vigili del Fuoco, risultano prive di regola tecnica verticale. All'indicazione dei livelli di prestazione minimi richiesti dalla

Committenza ed alle successive scelte del progettista per soddisfarli, si aggiunge l'attività di certificazione da parte dei Vigili del Fuoco.

Il raggiungimento dei livelli di prestazione IV o V tramite curve di incendio convenzionali risulta complesso e costoso; infatti oltre alle verifiche di resistenza si affianca un controllo degli spostamenti massimi e del grado di danneggiamento.

I modelli termofluidodinamici avanzati (condotti mediante il software FDS nella presente tesi) sono stati ritenuti gli unici a poter simulare l'incendio con meno incertezze, visto i notevoli volumi e le potenze termiche legati allo scenario di incendio. E' stata considerata partecipante all'incendio l'intera quantità di carburante ad uso aeronautico (JP4) contenuta in tutti i serbatoi di un singolo velivolo. La curva di rilascio del carburante è piatta e la potenza massima dipende dalla superficie del JP4 a contatto con l'aria, con valore costanti pari a 400 MW per una durata di incendio di poco più di 7 minuti. Questo notevole stress termico causa un aumento delle temperature a valori di 900°C già dopo due minuti, superiori a quelli dell'incendio convenzionale (ISO834).

La struttura sottoposta a curve convenzionali (ISO834) ha mostrato un'alta vulnerabilità in condizioni di incendio ( $t_R=10\text{min}$ ).

La verifica per singoli elementi fatta applicando il nomogramma indica che la sezione più vulnerabile all'incendio ha resistenza R30. Le analisi termomeccaniche avanzate con curve di incendio convenzionali mostrano una prestazione in termini di resistenza al fuoco anche inferiore (10 minuti).

Le curve convenzionali di incendio, anche in questo hangar, anche se si protegge interamente la struttura metallica, non permette il soddisfacimento dei requisiti richiesti per l'attività.

Le analisi avanzate, operate con l'approccio ingegneristico, mediante modelli CFD e termo-strutturali avanzati per la simulazione dello scenario di incendio e la valutazione dei suoi effetti sulla struttura, permette di riportare i seguenti risultati:

- la struttura sottoposta a curva naturale di incendio, non protetta, studiata nelle condizioni iniziali, resiste per l'intera durata dell'incendio: in termini di resistenza strutturale la capacità raggiunta è il livello III;

- la struttura protetta da vernici intumescenti ed esposta a curva naturale di incendio, resiste per l'intera durata dello stesso, ovvero le resistenze strutturali sono sempre superiori alle sollecitazioni per l'intera durata dell'incendio;
- in quest'ultima i campi di spostamento sono inferiori ai limiti di normativa e la struttura non presenta un grado di danneggiamento negli elementi più sollecitati (livelli IV o V).

Sul piano metodologico, per entrambi i casi studiati, l'approccio ingegneristico consente di misurare e confrontare la capacità e la domanda, sia in termini di resistenza (livelli II e III), sia di controllo degli spostamenti e del grado di danneggiamento per il livello IV e V.

In definitiva, le analisi condotte nelle presente mostrano anzitutto che le strutture metalliche traggono particolare vantaggio da approcci con modelli avanzati, su cui è basato l'approccio ingegneristico, che permettono di valutare con maggiore completezza ed affidabilità il livello di capacità portante in condizioni di incendio, rapportarlo alla domanda (resistenze, spostamenti massimi, danneggiamento) e quindi progettare *solo* gli interventi che consentano il soddisfacimento del requisito. Ciò è tanto più importante per le strutture strategiche, come quelle dell'Aeronautica Militare oggetto dell'attività.

La quantificazione del rischio di incendio è stata misurata sia in termini di probabilità di accadimento, sia in termini di danno associato (resistenza, spostamenti e danneggiamento elementi singoli).

Le strategie antincendio hanno mostrato come sia possibile intervenire su entrambi i fattori di rischio di incendio (probabilità e danno), nel caso dell'hangar ad uso magazzino.

Per l'hangar aviorimessa hanno mostrato, invece, come sia possibile raggiungere livelli IV e V proteggendo la struttura, senza intaccare in alcun modo l'operatività dell'hangar.

Ulteriori considerazioni finali che scaturiscono dal presente lavoro riguardano aspetti della normativa dedicati all'approccio prestazionale.

Le Norme Tecniche di Prevenzione Incendi (DM 03/08/2015) forniscono dei metodi per l'utilizzo di approcci prestazionali. Si pone l'attenzione su due aspetti, rilevati per i rispettivi hangar:

- potenza massima dell'incendio negli edifici industriali;
- parametri di valutazione del raggiungimento dei livelli IV e V.

Il valore di potenza massimo proposto dalla normativa per edifici di tipo industriale è funzione dell'area occupata dai carichi di incendio e della tipologia di edifici (civili/industriali). Tuttavia, come si è mostrato attraverso l'utilizzo di curve sperimentali, la potenza termica massima rilasciata dipende soprattutto dalla tipologia di materiale presente nel compartimento, dalla quantità e dalla modalità di rilascio termico. Tale aspetto dovrebbe essere tenuto in debito conto nel metodo di normativa.

I valori attuali di potenza massima indicati per gli edifici industriali sono di 500-1000 kW/m<sup>2</sup>, in rapporto all'area dell'incendio. Questi valori potrebbero essere affiancati da un coefficiente, amplificativo o riduttivo, che tiene conto della quantità di materiale (in kg) che occupa l'area di incendio, e del picco di potenza delle tipologie di materiali.

Si tratta di dati effettivamente reperibili (i test per molte tipologie di materiali di uso comune sono presenti) e sono disponibili anche dei metodi per scalare le quantità reali rispetto a quelle dei test. Le banche dati attuali riportano i poteri calorifici dei materiali (si veda la banca dati disponibile nel programma Claraf dei Vigili del Fuoco, per il calcolo del carico di incendio).

Per l'hangar aviorimessa è emerso come per questa tipologia di strutture, ulteriori indicazioni normative sui criteri per soddisfare i livelli IV e V siano auspicabili. Seppure demandate ai progettisti ed alle committenze, porre un riferimento potrebbe costituire un ulteriore impulso per l'uso pratico dell'approccio ingegneristico.

Infatti per le strutture metalliche una definizione specifica di ‘grado di danneggiamento’ potrebbe riguardare la percentuale degli elementi che tendono ad instabilizzarsi. Ciò porterebbe ad un criterio di controllo più severo inerente il livello massimo di temperatura negli elementi strutturali più sollecitati, dal momento che la riduzione di rigidità (modulo elastico) dell’acciaio è più repentina rispetto a quella della resistenza.

Per i livelli superiori al Livello III, indicare valori limite specifici, numero massimo di elementi instabilizzati, oppure temperature delle sezioni per le “soluzioni alternative” o “soluzioni in deroga”, costituirebbe un ulteriore impulso all’utilizzo di metodi avanzati della Fire Safety Engineering.

L’attuale assetto normativo è ancora di transizione e si è avuto modo di verificare, nell’ambito del presente lavoro, come l’approccio ingegneristico presenti dei vantaggi e possa essere utilizzato convenientemente ai sensi della normativa vigente. Tuttavia, uno scenario di sviluppo futuro per la tipologia di edifici industriali qui esaminata è l’approfondimento e l’integrazione delle indicazioni inerenti alcuni parametri suggeriti dalla normativa per l’utilizzo del metodo, parametri che permettano da un lato la corretta simulazione degli scenari di incendio, dall’altro la valutazione delle reali prestazioni strutturali.



## 8 Bibliografia

1. *Europei, Parlamento e Consiglio*. EUR-lex. [Online] 2011. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=celex%3A32011R0305>.
2. *VVF*. Nuove Norme Tecniche di Prevenzione Incendi. s.l. : Min.Int., 03 08 2015.
3. *DPR n.151 del 1 Agosto 2011*. 2011.
4. *Lenzi, Roberto*. La resistenza al fuoco delle strutture, II ed.
5. *Infrastr., Min*. Nuove Norme Tecniche delle Costruzioni (14/01/2008).
6. *ISO EN 834-8:2002*. rev. 2009.
7. *Kevin B. McGrattan, Randall J. McDermott, Craig G. Weinschenk, Glenn P. Forney*. Fire Dynamics Simulator, Technical Reference Guide, Sixth Edition. s.l. : NIST Pubs, 2013.
8. *ANTINCENDI, NUCLEO INVESTIGATIVO*. <http://www.vigilfuoco.it/>. [Online] <http://www.vigilfuoco.it/allegati/biblioteca/SemioticaIncendio.pdf>.
9. Eurocode 1 Actions on structures - Part 1-2: General Actions - Actions on structures exposed to fire. s.l. : UNI-EN. Regolamento.
10. A tool to design steel elements submitted to compartment fires — OZone V2. Part 2: Methodology and application. *J-F. Cadorin, D. Pintea, J-C. Dotreppe, J-M. Franssen*. 5, 2003, *Fire Safety Journal*, Vol. 38, p. 429–451.
11. A tool to design steel elements submitted to compartment fires—OZone V2 Part 1: pre- and post-flashover compartment fire model. *J-F. Cadorin, J-M. Franssen*. 5, 2003, *Fire Safety Journal*, Vol. 38, p. 395–427.
12. *Kevin, Ulf Wickström Dat Duthinh*. Adiabatic Surface Temperature for calculating heat transfer to fire exposed structures. [Online] 2007. [http://ws680.nist.gov/publication/get\\_pdf.cfm?pub\\_id=900083](http://ws680.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=900083).
13. *Jukka Hietaniemi, Simo Hostikka & Jukka Vaar*. FDS simulation of fire spread - comparison of model results with experimental data. *VTT Building and Transport*.

- Vuorimiehentie - Finlandia : JULKAISIJA — UTGIVARE , 2004. ISBN 951—38—6556—8.*
14. SAFIR: a thermal/structural program for modeling structures under fire. *Franssen, J.-M. 2005, English Journal, Vol. 42, p. 143–158.*
  15. *Knaack, Marcelle Size. Encyclopedia of US Air Force Aircraft and Missile Systems- Post-World War II Fighters 1945-1973. Washington, DC : History, Office of Air Force, 1978. Vol. 1 . ISBN 0-912799-59-5.*
  16. *Air Force e-publishing . [Online] <http://www.e-publishing.af.mil/>.*
  17. *ENGINEERING, VENETA. cert. 12167/2015 . VERONA : VENETA ENGINEERING, 2015.*
  18. *VV, AA. Design Guide Structural Fire Safety. 1978. Workshop CIB W14.*
  19. —. *SFPE Handbook of Fire Protection Engineering. [a cura di] Morgan J. Hurley, et al. 5th. Greenbelt : Aon Fire Protection Engineering, 2016. ISBN 978-1-4939-2565-0 .*
  20. *Burning Characteristics of Wooden Pallets as a Test Fuel (Serial 16437). Krasner, L. M. Norwood : s.n., 1968, Factory Mutual Research Corp, p. -.*
  21. *Burning of Electrical Household Appliances—An Experimental Study. Hietaniemi, J. Mangs, Hakkarainen. Espoo, Finland : s.n., 2001. Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. p. (VTT Research Notes 2084).*
  22. *Espoo, Valtion Teknillinen Tutkimuskeskus. 2001 .*
  23. *VVF. Claraf 3.0.*
  24. *5th, SFPE Handbook of FPE.*
  25. *Hietaniemi, J. Hakkarainen, T. Huhta, J. Korhonen, T. Siiskonen, J. & Vaari. Fire Safety of cavity spaces. Experimental and simulation study of fires in cavities. 2002.*
  26. *Design guide Structural Fire Safety Workshop . W14, CIB. 1978.*
  27. *Potato Crisps and Cheese Nibbles Burn Fiercely. Arvidson, M. 2005. Brandposten . p. [SPJ No. 32, 10-11.*
  28. *A Study of Full-Scale Flammability of Flame Retardant and Non-Flame Retardant Curtains. Yamada, T., Yanai, E., and Naba, H. Tokyo : Japan Assn. for Fire Science & Engineering, 2000. in Proc. 4th Asia-Oceania Symp. on Fire Science & Technology . p. pp. 463-473.*
  29. *Fire Behaviour of Household Appliances towards External Ignition. Beard, A., and Goebeldecker, S. Brussels : s.n., 2007. European Fire Retardants Assn.*
  30. *Steinert, C. Smoke and Heat Production in Tunnel Fires. Swedish National Testing & Research Institute, Bora's. 1994, p. pp. 123-137 in Proc, Intl, Conf, on Fires in Tunnels (SP Report 1994:54) .*
  31. *Fire Tests of Men's Suits on Racks . Stroup, D. W. De Lauter, L. Lee, J. and Roadarmel, G. 2001, (FR 4013), Nat. Inst. Stand. and Technol. Gaithersburg MD.*
  32. *Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings. BRE, ECSC. 2001.*

33. Wetterlund, I., and Goransson, U.,. A Full Scale Fire Test Method for Free-Hanging Curtain and Drapery Textiles. *Swedish National Testing Institute, Bora's : SP Report 1988:45*, 1988.
34. Moore, L. D. Full-scale Burning Behavior of Curtains and Drapes. [U.S.] *Nat.Bur. Stand., Washington : NBSIR*, 1978. p. 78-1448.
35. Tenda media multifunzionale a struttura pneumatica. *MINISTERO DIFESA. Roma : Esercito Italiano*, 2012. *Specifiche Tecniche n° 274/UI-CAS*.
36. Specifiche Tecniche n. 316/U.I. - VIVERI . *MINISTERO DELLA DIFESA . 2012. Dispaccio n. M\_D GCOM 3/3535 del 20 giugno 2012 .*
37. Madrzykowski, D. unpublished test results . 2012.
38. MILTECH srl. [Online] <http://www.miltechsrl.com>.
39. Sundstrom, B., ed. Fire Safety of Upholstered Furniture--The Final Report on the CBUF Research Programme (Report EUR 16477 EN). Directorate General Science, Research and Development (Measurements and Testing). *European Commission. London : Distributed by Interscience Communications Ltd*, 1995.
40. AA.VV. Demonstration of real fire tests in car parks and high buildings. *Vernon (Francia) : ECSC BRE*, 2001.
41. Eurocode 3 Design of steel structures Part 1-2: General Rules - Structural fire design. s.l. : *UNI-EN. Regolamento*.
42. Acciaio, *Commissione per la Sicurezza delle Costruzioni in*. <http://www.promozioneacciaio.it/>. [Online] <http://www.promozioneacciaio.it/cms/it4909-nomogramma.asp>.
43. A case-study of existing steel building subjected to a real fire: structural investigation and thermo-mechanical analysis. N. Di Fiore, I. Del Prete, E. Nigro, L. Ponticelli, G. Di Stefano. *Salerno : Collegio dei Tecnici dell'Acciaio*, 2015. *XXV Congresso C.T.A. (Collegio dei Tecnici dell'Acciaio)*.
44. E. Nigro, S. Pustorino, G. Cefarelli, P. Princi. Progettazione di strutture in acciaio e composte acciaio-calcestruzzo in caso di incendio. s.l. : *HOEPLI*, 2014. *ISBN 978-88-203-4400-9*.
45. Tests on intumescent paints for fire protection of existing steel structures. Bilotta A., de Silva D., Nigro E. 2016, *Construction and Building Materials*, p. 410–422.
46. Scientists, *FAS Federation of American. Military Analysis Network*. [Online] <https://fas.org/man/dod-101/sys/ac/row/atlantique.htm>.
47. Fabian, Thomas. UPHOLSTERED FURNITURE FLAMMABILITY. s.l. : *Underwriters Laboratories Inc. , 2013*.
48. Klinzmann, C. s.l. : *COST European Cooperation in Science and Technology*.
49. Estimating Large Pool Fire Burning Rates. V., Babrauskas. 19, 1983, *Fire Technology*, p. 251-261.

50. —.Babrauskas, V. 19, 1983, *Fire Technology*, p. 251-261.
51. CIB W14 Workshop Report Design guide – structural fire safety. *VV, AA.* 1986, *Fire Safety Journal*, p. 77-126.
52. Investigation activity about a collapsed steel structure subjected to a real fire. *I. Del Prete, N. Di Fiore, E. Nigro, L. Ponticelli, G. Di Stefano. Dubrovnik, Croazia : s.n. ASFE (Application of Structural Fire Engineering).*